

Universidad Complutense de Madrid

Facultad de Geografía e Historia

Máster en Ciudades Inteligentes y Sostenibles (Smart Cities)

Análisis de la dinámica de los contaminantes (NO_2 - $\text{PM}_{2.5}$) en el Área Metropolitana de Madrid a partir de la monitorización de la Isla de Calor Urbana (ICU) y su relación con la COVID-19

La Geografía Física Urbana en el contexto pandémico

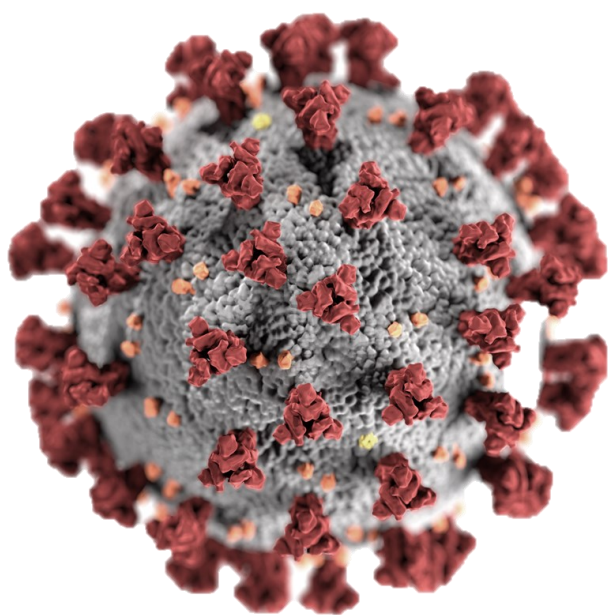
Autor: Jorge Martínez Escobar

Tutores: María Eugenia Pérez González y José Úbeda Palenque

Co-asesor: Adrián Fernández Sánchez

Facultad de Geografía e Historia. Departamento de Geografía

Septiembre 2021



Resumen- La baja calidad del aire viene determinada por el volumen de concentración de partículas y gases contaminantes presentes en la atmósfera. La correlación entre la contaminación atmosférica y la salud ambiental urbana ha sido estudiada y demostrada, entre otros, por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

El área de estudio se caracteriza en la región metropolitana de Madrid (España), cuyo desarrollo está marcado por las condiciones geográficas, económicas y de la red de transporte.

En general, el clima urbano, también Madrid como en cualquier gran urbe, hace que la temperatura en el interior de la ciudad sea mayor que en la periferia. Esta diferencia se incrementa en situaciones de estabilidad debido a la acción de los anticiclones, que suelen originar, en invierno, inversión térmica, y favorecer el incremento de la contaminación atmosférica y la aparición de la Isla de Calor Urbana (ICU).

El objetivo principal de este estudio es analizar la relación en diferentes periodos entre el fenómeno de la isla de calor, acompañado de la concentración de los contaminantes como el dióxido de nitrógeno (NO_2) y el material particulado ($\text{PM}_{2.5}$), en el área metropolitana de Madrid.

El periodo seleccionado, 2019-2020, permite obtener una imagen estacional variada de la evolución de los contaminantes a analizar. Junto a lo anterior, se observa la dinámica del efecto Isla de Calor Urbana (ICU) a lo largo del año y se compara con episodios de interés, como las diferentes medidas sanitarias de restricción de la movilidad debido a la pandemia provocada por el virus del SARS COV-2. También se evalúa el impacto de la pandemia en los dos fenómenos analizados y se establecen relaciones respecto a los diferentes indicadores de la enfermedad.

Para ello, se seleccionan una serie de estaciones de medición de contaminantes y temperaturas situadas en la región de Madrid, de las que se obtienen datos de temperatura, NO_2 y $\text{PM}_{2.5}$. A partir del tratamiento analítico de estos datos, se genera distintas bases de datos que posteriormente se procesan en Sistemas de Información Geográfica (ArcGIS Pro y ArcMap), donde se realizarán modelos de interpolación con los datos de contaminación, con el objetivo de generar capas ráster para el análisis zonal en el periodo de estudio. Además, se realiza un análisis de la temperatura superficial y de brillo de la zona de estudio, a partir de imágenes Landsat 8 con el software ERDAS IMAGINE, con el que se elaboran perfiles térmicos de temperatura, y se localizan las distintas islas de calor, y el establecimiento del comportamiento espacial de estas. Finalmente, se comparan los resultados para dar solución a la hipótesis de partida.

Como resultado de la comparación entre los diferentes modelos analíticos, se pretende estudiar la correlación entre las diferentes zonas de la ciudad y la relevancia que tiene la Isla de Calor Urbana (ICU) en la contaminación atmosférica y que relación existe con la COVID-19. Asimismo, es de interés el contexto en el que se desarrolla esta relación, para poner en marcha estrategias que hagan que las zonas urbanas sean respirables y saludables.

Así, la discusión viene dada por la confirmación o no de la hipótesis de partida, de qué factores afectan a los diversos espacios urbanos del área metropolitana de Madrid, cual es la correlación entre ellos y la propuesta teórica de estrategias y soluciones para cambiar las diversas dinámicas contaminantes que se observan en el estudio.

Entre las conclusiones más relevantes destacar que la Isla de Calor Urbana (ICU) posee una evidente tendencia de localización central con distribución hacia sur y este; que existen diferencias notables de temperatura entre áreas urbanas y no urbanizadas; que según lo observado existe mayor correlación entre el NO_2 y la temperatura, que con el $\text{PM}_{2.5}$; que es posible vislumbrar una correlación entre la contaminación y la COVID-19, pero que, sin embargo, esta última supone todavía un reto y una dificultad debido a la multitud de factores que la afectan y su origen reciente, y, por último, que existe la evidencia de que la COVID ha cambiado la forma de construir ciudad y las perspectivas de la futura "Smart City".

Palabras Clave — Calidad del Aire, Isla de Calor, NO_2 , $\text{PM}_{2.5}$, SARS COV-2, Clima Urbano.

Abstract- Low air quality is determined by the volume of concentration of polluting particles and gases present in the atmosphere. The correlation between air pollution and urban environmental health has been studied and demonstrated, among others, by the World Health Organization (WHO).

The study area is characterised by the metropolitan region of Madrid (Spain), whose development is marked by geographical, economic and transport network conditions.

In general, the urban climate, also in Madrid as in any large city, means that the temperature inside the city is higher than in the periphery. This difference increases in situations of stability due to the action of anticyclones, which tend to cause thermal inversion in winter, favouring an increase in atmospheric pollution and the appearance of the Urban Heat Island (UHI).

The main objective of this study is to analyse the relationship in different periods between the heat island phenomenon, accompanied by the concentration of pollutants such as nitrogen dioxide (NO₂) and particulate matter (PM_{2.5}), in the metropolitan area of Madrid.

The selected period, 2019-2020, allows us to obtain a varied seasonal picture of the evolution of the pollutants to be analysed. In addition, the dynamics of the Urban Heat Island (UHI) effect is observed throughout the year and compared with episodes of interest, such as the different health measures restricting mobility due to the pandemic caused by the SARS COV-2 virus. The impact of the pandemic on the two phenomena analysed is also assessed and relationships are established with respect to the different indicators of the disease.

For this purpose, a series of pollutant and temperature measurement stations located in the region of Madrid are selected from which data on temperature, NO₂ and PM_{2.5} are obtained. From the analytical treatment of these data, different databases are generated and subsequently processed in Geographic Information Systems (ArcGIS Pro and ArcMap), where interpolation models are made with the pollution data, with the aim of generating raster layers for zonal analysis in the study period. In addition, an analysis of the surface temperature and brightness of the study area is carried out using Landsat 8 images with the ERDAS IMAGINE software, with which thermal temperature profiles are elaborated, and the different heat islands are located, and their spatial behaviour is established. Finally, the results are compared to provide a solution to the initial hypothesis.

As a result of the comparison between the different analytical models, it is intended to study the correlation between the different areas of the city and the relevance of the Urban Heat Island (UHI) in atmospheric pollution and its relationship with COVID-19. The context in which this relationship develops is also of interest, to implement strategies to make urban areas breathable and healthy.

Thus, the discussion is given by the confirmation or not of the starting hypothesis, which factors affect the various urban spaces in the metropolitan area of Madrid, what is the correlation between them and the theoretical proposal of strategies and solutions to change the various polluting dynamics observed in the study.

Among the most relevant conclusions, it is worth highlighting that the Urban Heat Island (UHI) has an evident tendency towards a central location with a distribution towards the south and east; that there are notable differences in temperature between urban and non-urbanised areas; that according to what has been observed, there is a greater correlation between NO₂ and temperature than with PM_{2.5}; that it is possible to glimpse a correlation between pollution and COVID-19, but that, nevertheless, the latter is still a challenge and a difficulty due to the multitude of factors that affect it and its recent origin; and, finally, that there is evidence that COVID has changed the way of building a city and the prospects for the future "Smart City".

Keywords — Air Quality, Heat Island, NO₂, PM_{2.5}, SARS COV-2, Urban Climate.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN	5
1.1 Ciudad Actual.	5
1.2 Ciudad del Futuro.	5
1.3 Clima Urbano y Efecto Isla de Calor.	7
1.4 Calidad del Aire y Contaminación.	7
1.5 La COVID-19.	9
1.6 Contexto actual.	11
1.6.1 Efecto Isla de Calor y Calidad del Aire.	11
1.6.2 La COVID-19 y su relación con las variables de temperatura y contaminación	12
1.7 Descripción del estudio.	14
1.8 Hipótesis de Partida.	15
1.9 Objetivos.	16
2. ÁREA DE ESTUDIO	17
2.1 Características generales del Área Metropolitana de Madrid.	18
2.1.1. Estructura Socioeconómica	18
2.2.2 Estructura territorial	18
2.2.3 Estructura Físico- Ambiental	19
2.2 La Isla de Calor Urbana (ICU) en el Área Metropolitana de Madrid.	19
2.3 La calidad del aire y la contaminación en Área Metropolitana de Madrid.	20
2.4 La COVID-19 en el Área Metropolitana de Madrid.	21
3. METODOLOGÍA	22
3.1 Datos abiertos y fuentes. La importancia de la información accesible.	22
3.2 Los Sistemas de Información Geográfica como herramienta fundamental.	22
3.3 Cálculo del efecto Isla de Calor Urbana (ICU) a partir de la temperatura del aire.	23
3.4 Cálculo de la temperatura de superficie en el área metropolitana de Madrid.	28
3.5 Medida de contaminación de NO ₂ y PM _{2.5} .	30
3.6 Cálculo de indicadores referentes a la COVID-19 en el Área Metropolitana de Madrid.	31
3.7 Correlación de las variables de temperatura y contaminación por NO ₂ y PM _{2.5} .	31
3.8 Correlación entre la COVID-19 y las distintas variables.	31
4. RESULTADOS	32
4.1 Isla de Calor Urbana (ICU) en el Área Metropolitana de Madrid.	32
4.2 Temperatura de superficie en el Área Metropolitana de Madrid.	34
4.3 Contaminación por NO ₂ (Dióxido de Nitrógeno) en el Área Metropolitana de Madrid.	36
4.4 Contaminación por PM _{2.5} (Material Particulado) en el Área Metropolitana de Madrid.	38
4.5 La COVID-19 en el Área Metropolitana de Madrid.	40
4.6 Correlación entre temperatura y contaminación por NO ₂ .	41
4.7 Correlación entre temperatura y contaminación por PM _{2.5} .	42
4.8 Correlación entre temperatura y COVID-19.	43

4.9 Correlación entre la calidad del aire y la COVID-19.	44
4.10 Correlación entre la contaminación por NO ₂ y PM _{2.5} y la COVID-19.	44
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS	46
5.1 Isla de Calor Urbana (ICU) en el Área Metropolitana de Madrid.	46
5.2 Temperatura de Superficie en el Área Metropolitana de Madrid.	47
5.3 Contaminación por NO ₂ (Dióxido de Nitrógeno) en el Área Metropolitana de Madrid.	48
5.4 Contaminación por PM _{2.5} (Material Particulado) en el Área Metropolitana de Madrid.	49
5.5 La COVID-19 en el Área Metropolitana de Madrid.	49
5.6 Correlación entre temperatura y contaminación por NO ₂	50
5.7 Correlación entre temperatura y contaminación por PM _{2.5}	51
5.8 Correlación entre temperatura y COVID-19	51
5.9 Correlación entre contaminación por NO ₂ y PM _{2.5} y la COVID-19	52
5.10 Correlación entre la contaminación por NO ₂ y PM _{2.5} y la COVID-19.	52
6. CONCLUSIONES	54
7. BIBLIOGRAFÍA	56
8. ANEXO	59
8.1 Isla de Calor Urbana (ICU) en el Área Metropolitana de Madrid.	59
8.2 Temperatura de Superficie en el Área Metropolitana de Madrid.	65
8.3 Contaminación por NO ₂ (Dióxido de Nitrógeno) en el Área Metropolitana de Madrid.	67
8.4 Contaminación por PM _{2.5} (Material Particulado) en el Área Metropolitana de Madrid.	72
8.5 La COVID-19 en el Área Metropolitana de Madrid.	77
8.6 Correlación entre temperatura y contaminación por NO ₂	80
8.7 Correlación entre temperatura y contaminación por PM _{2.5}	81

1. INTRODUCCIÓN

El modelo de ciudad contemporánea se encuentra envuelto en un cambio exigido por el impacto en la salud pública de las epidemias y diferentes problemáticas relacionadas con las condiciones de higiene y salubridad de la infraestructura urbana. El cambio de modelo de esta ciudad actual a un modelo de ciudad innovadora, inteligente y sostenible es uno de los principios rectores del análisis que se va a realizar en el presente estudio.

1.1 Ciudad Actual.

Las circunstancias descritas en el epígrafe anterior se produjeron mayoritariamente en la primera mitad del siglo XIX, especialmente algunas como las del cólera, dieron lugar a una estructura social en la que la higiene se convirtió en esencial para el desarrollo de las ciudades. Las investigaciones científicas daban lugar a entender que las condiciones insalubres en las que vivía gran parte de la población eran, junto a la desnutrición, causa directa de las sucesivas enfermedades que azotaban a las urbes. El higienismo puso las bases del nuevo modelo de ciudad que perduró hasta el siglo XXI. El urbanismo higienista, se basó en el sol y la ventilación, optando por un viario rectilíneo y de amplitud, por la mejora de las infraestructuras del agua y por la incorporación del espacio verde, desplazando la industria a la periferia de las ciudades. (Capdepon, 2015)

Hasta inicios de 2020 se convivía con el convencimiento de que el modelo urbano generaba una protección obvia sobre este tipo de problemáticas que parecía, eran de otros tiempos. El imparable crecimiento de la urbanización expansiva, con una “mancha” edificada y construida como reacción a las epidemias descritas generaba la falsa inseguridad de intocabilidad ante futuras pandemias. No obstante, existían ya multitud de indicios del modelo de ciudad no era capaz de dar respuesta satisfactoria (Escolano-Utrilla et al; 2018) y necesaria a los parámetros planteados por el Siglo XXI.

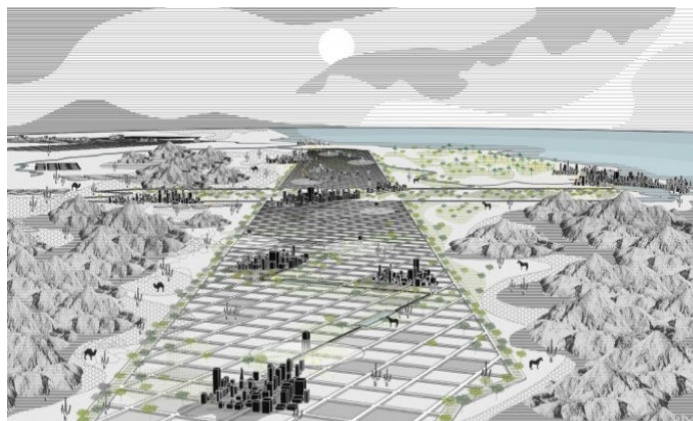


Figura 1. 'Apart, We Are Together'. Fuente: Design Earth

Si la problemática hace dos siglos procedía de la baja calidad de la infraestructura higiénica urbana y sus sistemas de saneamiento y por ende la calidad del agua, en la actualidad la escasa calidad del aire urbano provocada por la movilidad motorizada, la sobrepoblación de las ciudades y modelo de vida era uno de los factores que indicaba enfermedades respiratorias endémicas en la población urbana. No sólo eso, cuestiones referentes a la contaminación, el efecto isla de calor y el excesivo consumo de energía y recursos hacen pensar en una modificación agresiva del ideario urbano, ya que esta ciudad higienista se encuentra amenazada por diversos factores (Secchi, 2004) que se han puesto de manifiesto con la situación sanitaria actual

1.2 Ciudad del Futuro.

La pandemia provocada por el virus SARS COV 2 ha alterado de forma drástica los hábitos urbanos y el modo de vivir la ciudad. La estructura urbana, continúa, pero los distintos flujos sociales y económicos se han transformado radicalmente. Este nuevo agente, del que se hablará con más profundidad posteriormente, ha incrementado el flujo e intercambio datos y sistemas de telecomunicación, que se han convertido en nuevos espacios sociales. (Hernández et al; 2021)

Afrontada la vorágine de acontecimiento que se han sucedido desde el comienzo de la pandemia y su velocidad, que han generado nuevos hábitos tanto a nivel urbano, como laboral y personal, la población urbana mundial se enfrenta ahora a un posible cambio de paradigma urbano basado en el concepto, actualizado, de ciudad inteligente. Una ciudad que facilite la movilidad mejore los servicios sociales, apueste

por la eficiencia energética y la sostenibilidad ambiental a partir de la participación ciudadana. En general, que marque como objetivo, mejorar la eficiencia de sus políticas, reducir al máximo los residuos y molestias, fomentar la calidad social y económica y maximizar la inclusión social. El adjetivo inteligente, se trata de una herramienta que se debe asociar a la capacidad de generar bienestar en la sociedad partiendo del principio de que son los ciudadanos los que crean ciudad y no al contrario.



Figura 2. Ciudad Futura. Fuente: El Economista

Sin embargo, existe la posibilidad de que el modelo de ciudad inteligente tenga que ser actualizado y adaptado al nuevo contexto que ha planteado la COVID-19. La tendencia contemporánea de la población mundial es de una despoblación del mundo rural en pro de las grandes ciudades, pero la percepción de que la pandemia afecta con mayor vehemencia a las urbes de gran tamaño y dinamismo, debido a su densidad poblacional y su globalidad, se traduce en un próximo replanteamiento de las ciudades donde existe la posibilidad de una reorganización territorial a partir de un reparto equilibrado de dotaciones públicas y actividades productivas. Además tendrá que adaptarse a un modelo laboral de teletrabajo donde la vivienda actual tendrá que hacerlo también al espacio intermedio entre lo doméstico y lo laboral.

El enfoque ira encaminado a mejorar los entornos urbanos para facilitar a la población el acceso a las opciones más saludables. Por ejemplo, las políticas que promueven el transporte sostenible y activo es decir, caminar o ir en bicicleta favorecen practicar actividad física y reducir el sedentarismo, así como disfrutar de menores niveles de contaminación. Parece que, más allá de la gran metrópoli centralizada, la tendencia vira hacia espacios urbanos autónomos que puedan adaptarse más fácilmente a futuros retos

La población se encamina, por tanto, a un modelo de ciudades conectadas, estilo diamantes territoriales, con urbes de distinta escala y una estructura policéntrica. Para ello, será necesario reconvertirlas para que funcionen y dividir las en piezas más o menos autónomas que sean capaces de responder individualmente a los nuevos requerimientos de un planeta superpoblado y globalizado. La movilidad, será uno de los ejes fundamentales de la reconversión, ya que se trata de una cuestión crítica que ha dado lugar a la mayor parte de los problemas que actualmente se padecen como el cambio climático, la contaminación o la disminución de los servicios que nos suministran los ecosistemas, y que favorece no solo la aparición sino también la difusión de las pandemias. Se tratará, por tanto, de modificar los patrones de movilidad, reconvirtiendo las ciudades en urbes de cercanía y accesibilidad contando con calles más amplias y calzadas más estrechas. En una ciudad de proximidad, los desplazamientos serán básicamente andando o en bicicleta por lo que el espacio dedicado a los vehículos a motor se verá notablemente reducido lo que se podría dar lugar a pensar en calzadas de uso compartido con prioridad al peatón.

Los acontecimientos actuales, han modificado la manera de ver y entender la ciudad y sus modos de vida, la correlación entre diversas variables es de un especial interés para la investigación, dando lugar a diversas soluciones para la vida urbana futura. Es por ello, por lo que es preciso revisar lo anteriormente mencionado, observando cómo influyen las diversas variables de la ciudad actual, como el fenómeno de la Isla de Calor Urbana o la calidad del aire en el contexto pandémico.

1.3 Clima Urbano y Efecto Isla de Calor.

Las ciudades conforman una de las formas más radicales de transformación del paisaje natural debido a que su impacto además de modificar el espacio ejerce de factor transformante en las variables climática y ambientales. Aparece así una incipiente antropización del territorio en la que la actuación del ser humano se plasma en una doble vertiente. Por una parte, las modificaciones que introduce directa y conscientemente y que tienen su manifestación en el plano y la morfología urbanas, por otra, las que se derivan de ese espacio construido y las actividades desarrolladas en él, cuyas consecuencias son la contaminación y la aparición de un clima específico de la ciudad, el denominado **clima urbano**. (Cañada Torrecillas et al; 2012).

Este es considerado como el tiempo regional modificado, con condiciones climáticas transformadas por las áreas urbanas y cuya definición se realiza en términos de comparación con su entorno próximo, siendo desde esta óptica posible generalizar el concepto a otras ciudades, cualquiera que sea su localización, aunque cada una de ellas conserve

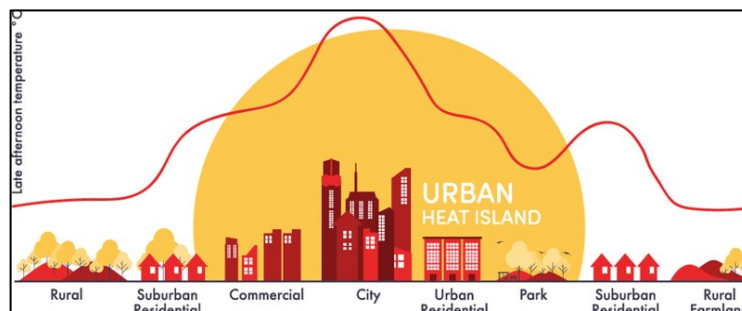


Figura 3. Diagrama del efecto de la Isla de Calor Urbana (ICU) (Skopje Lab, 2018).

los rasgos climáticos específicos de la región en la que se sitúa.

La manera óptima de caracterizar estos climas urbanos es por medio del llamado Efecto Isla de Calor Urbana (ICU) lo que supone que un área urbanizada posee temperaturas mayores que su entorno más próximo y como se observa (fig.3), se trata de fenómeno de origen térmico que se produce en estas áreas urbanas y que consiste en la existencia de una temperatura diferente, que tiende a ser más elevada especialmente durante la noche, en el centro de las ciudades, donde la espacio urbano se encuentra más saturado que en las áreas de alrededor, como extrarradios o zonas rurales. Es decir, cuanto más nos alejamos del centro hacia la periferia las temperaturas tienden a descender (Román et al; 2017).

Lo anterior, viene dado por varias causas, entre las que se encuentra la densidad edificatoria que impiden una correcta ventilación de la trama urbana, los materiales utilizados en las ciudades como el asfalto el cemento retienen en mayor medida el calor, la escasa eficiencia energética de los edificios, o la reducida cubierta vegetal que encontramos en algunas zonas de la ciudad y que evita la evapotranspiración. (Peiró et al; 2016)

Esta, es una de las variables con mayor importancia dentro de la definición de los climas urbanos, existiendo dos tipologías claves para su análisis:

- **Isla de calor atmosférico**, siendo esta la diferencia de temperaturas en el aire, entre las zonas urbanas y rurales.
- **Isla de calor superficial**, definida como las diferencias térmicas entre las superficies artificiales y las naturales.

Este último, se trata del método más adecuado para la especificación de los climas urbanos y como se verá posteriormente, uno de los más utilizados.

1.4 Calidad del Aire y Contaminación.

Entendemos por contaminante a una sustancia o energía introducida en el medio ambiente que tiene efectos no deseados o que afecta negativamente a la utilidad de un recurso. Estos se dividen en dos tipologías, los contaminantes primarios son los que se emiten directamente a la atmósfera: CO, SO₂, NO₂... y proceden de distintas fuentes como el tráfico, las calderas, la industria, los procesos de fabricación, flujos y dinámicas que se dan en mayor volumen y frecuencia en las grandes áreas urbanas, que se ven más afectadas por los

misimos. Otros, son los contaminantes secundarios que se forman mediante procesos fisicoquímicos y que se forman a partir de los primeros. (Miranda G.L, 2017)

Por ello, uno de los grandes desafíos a los que se enfrenta la sostenibilidad urbana, son los cambios y diferentes impactos y consecuencias tanto cualitativos como cuantitativos no deseados que surgen de las dinámicas de funcionamiento de las ciudades y los efectos que tienen sobre sus entornos,

derivados o asociados del modo de vida urbano (Franco, 2012), los cuales se podrían estructurar de la siguiente manera:

- **Efectos Ambientales:** por empeoramiento de la calidad del aire urbano, por aumento de las emisiones contaminantes y contribución de algunos de éstos y del CO₂ emitido al cambio climático.
- **Efectos sociales:** asociados al riesgo de padecer enfermedades, aumento de la morbilidad y mortalidad por contaminación del aire, y a las pérdidas o degradación de los ecosistemas.
- **Efectos económicos:** asociados tanto a los impactos sociales mencionados, y que a veces se denominan externalidades por no estar internalizados como costes, como los directamente resultantes de pérdidas de productividad y degradación de espacios, materiales y del patrimonio cultural.

Los principales contaminantes en áreas urbanas establecidos por la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA) son:

- **Partículas Finas:** Conocidas como Materia Particulada (PM), por sus siglas en inglés, se trata del elemento con mayor capacidad para provocar muertes prematuras. Las de mayor nocividad son las PM_{2.5} y las de PM₁₀.
- **Óxidos de Nitrógeno (NOX):** Se trata de gases que provocan afecciones en el aparato respiratorio, produciendo irritación en la piel y las mucosas, aumentando la predisposición a infecciones causadas por virus.
- **Ozono troposférico:** Provoca afecciones en la salud y procede en su mayoría del tráfico y la industria.
- **Óxidos de Azufre (SOX):** Causan irritación en vías respiratorias y lesiones en el tejido pulmonar, proviene sobre todo de la combustión del carbón e hidrocarburos de alto contenido en azufre.

Esto define el indicador principal por el que medir uno de los aspectos ambientales y de salud pública de mayor relevancia para las ciudades como es la llamada inmisión o calidad del aire definida como la concentración de estos contaminantes que llega a un receptor, más o menos lejano de la fuente de emisión, una vez transportado y difundido por la atmósfera.

Numerosos estudios han encontrado correlaciones tanto positivas como negativas con respecto a los contaminantes principales (Pm_{2.5} y No₂) con algunas variables ambientales, la cual es más notoria para el contaminante PM_{2.5} (Wang y Ogawa, 2015, Sá et al; 2017, Yang et al; 2020).



Figura 4. Calidad del Aire. Fuente: Ágora Diario

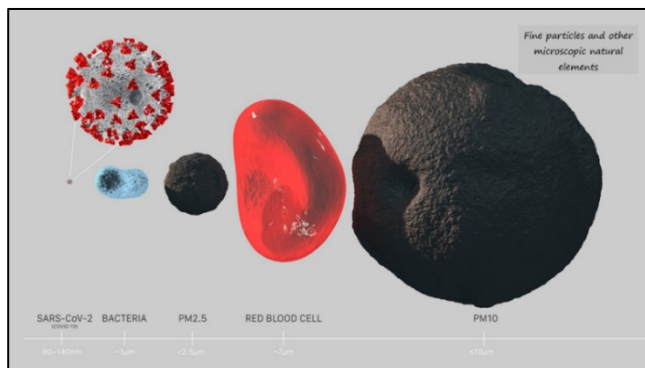


Figura 5. Tamaño partículas de contaminación. Fuente: OMS

Particularmente, la relación positiva entre el $PM_{2.5}$ y el incremento de la temperatura pasa por la producción de precursores secundarios del contaminante y la reacción fotoquímica generada. (Chen et al; 2020)

1.5 La COVID-19.

La enfermedad **COVID-19** está causada por el virus **SARS-CoV-2**, un nuevo tipo de coronavirus que puede afectar a las personas y que se detectó por primera vez en diciembre de 2019 en la ciudad de Wuhan, provincia de Hubei, en China.

Las referencias actuales indican que el virus se propaga, principalmente, a partir de gotas respiratorias entre personas que se encuentren en contacto cercano. Esto implica que zonas con mayor densidad de población y movilidad pueden verse más afectadas por una expansión exponencial del virus.

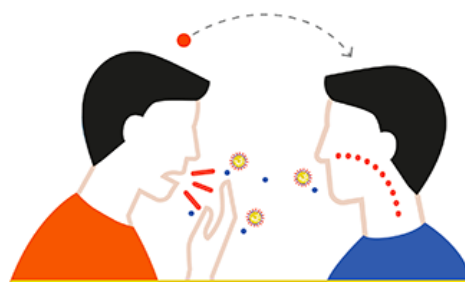


Figura 5. Transmisión COVID19. Fuente: OMS

La globalización causó una rápida expansión y en cuestión de tres meses, a partir de marzo de 2020, los grandes países del mundo comenzaron un aumento exponencial de los casos y las muertes, principalmente en los nodos principales de comunicación a nivel mundial.

Por ello, Las zonas urbanas son la zona cero de la pandemia del COVID-19, con un 90 % de los casos comunicados. Las ciudades están sufriendo las peores consecuencias de la crisis, muchas de ellas con sistemas de salud sobrecargados, economías en caída y sistemas urbanos desintegrados, además de otros problemas. Este es el caso en particular en las zonas con mayor vulnerabilidad social, donde la pandemia ha puesto de manifiesto desigualdades profundamente arraigadas. (Bastidas y Delgado, 2020)

Las consecuencias han sido devastadoras a todos los niveles, desde el sanitario, pasando por el económico al urbano y social, lo que ha provocado un cambio en el modelo global de las ciudades, que como se ha mencionado con anterioridad, ha modificado la forma de entender lo urbano y cuyos resultados finales serán a muy largo plazo.

Anteriormente se ha observado tanto el comportamiento de la contaminación, como de la temperatura en las ciudades. Así pues, según algunos estudios, la contaminación atmosférica tiene una sinergia importante con la temperatura. Esto significa que en ciudades con elevado índice de contaminantes las diferencias térmicas entre la ciudad y su entorno se intensifican, aumentando la isla de calor urbano puesto que las partículas contaminantes, como se ha mencionado, no permiten que la radiación emitida por la superficie de la ciudad escape hacia la atmósfera, devolviéndola a la superficie provocando un ascenso de la temperatura (Yang et al; 2020).

En general, son múltiples los efectos negativos del fenómeno especificado, especialmente en el incremento de la mortalidad, cuando las temperaturas se elevan durante las olas de calor. Pero, sin embargo, la mortalidad no sólo es producida por las altas temperaturas sino la combinación entre la contaminación atmosférica y estas, lo cual explica la mayor mortalidad en las ciudades en comparación a zonas rurales (Li et al; 2015).

Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el empobrecimiento de la calidad del aire supone un incremento en el riesgo medioambiental para la salud humana. De forma continuada, lanza mensajes e informes que ponen en alerta respecto a la superación de valores límite en materia de contaminación atmosférica y el peligro al que se expone la ciudadanía de las grandes áreas metropolitanas.

La OMS, en dos informes de 2014 y 2016 (OMS, 2014 y 2016) exponía que el 92 % de la población mundial reside en lugares donde se superan de forma continuada los valores guía de la calidad del aire, provocando esto aproximadamente 4,6 millones de defunciones prematuras en el mundo a lo largo del año.

Según los anteriores estudios revisados, se puede establecer una relación de la contaminación con un empeoramiento de la salud da la población, generando una problemática que afecta a todos los ámbitos que conforman la ciudad, siendo además una de las temáticas principales en la denominada ciudad inteligente. Se promulgan, de forma continuada, el potencial de la Smart City en el ámbito ambiental y la influencia que supone sobre la calidad del aire, suponiendo además uno de los principales desafíos para estas, que harán necesaria la apuesta por una convivencia entre la innovación y el desarrollo sostenible por igual.

En este contexto, la aparición de la pandemia provocada de la enfermedad COVID-19, ha puesto de manifiesto grandes problemáticas sociales, ambientales y económicas que han provocado un giro de 360° en las políticas, estrategias y hábitos a seguir en multitud de ámbitos de la vida cotidiana de las ciudades. La calidad del aire no ha quedado libre de verse afectada por la revolución que ha supuesto la COVID 19. Se han llevado a cabo una gran variedad de estudios en referencia a la relación de esta variable con otras dinámicas que se dan en las ciudades, las cuales generan un amplio campo de investigación en la actualidad susceptible de ser analizado en profundidad. (Schwela, 2018)

Según la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA), la contaminación sufrió durante 2020 grandes disminuciones en su concentración, en gran parte debido a la reducción del tráfico y de la vida diaria especialmente en ciudades cuyas medidas de prevención fueron más estrictas. En España, según estos datos, se observaron reducciones importantes (fig.6) en los niveles de NO₂ (Dióxido de Nitrógeno) durante las tres primeras semanas de confinamiento por la pandemia comparado con los niveles en el mismo periodo del año 2019, Madrid y Barcelona son las ciudades donde las diferencias son más manifiestas, por presentar previamente un aire de peor calidad, con una reducción entre el 41% y 55%, respectivamente (AEMA, 2021)

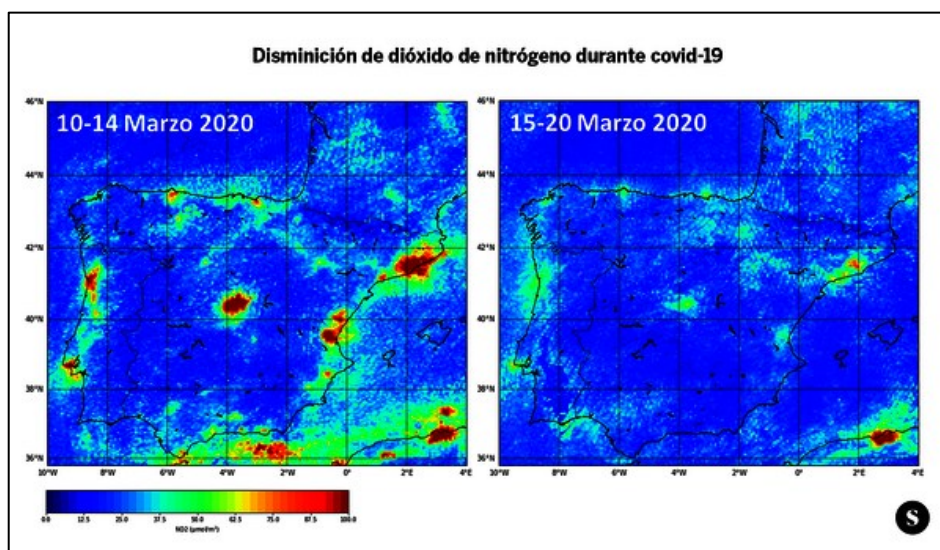


Figura 6. Evolución CO₂. Universidad Politécnica de Valencia

Así pues, la contaminación del aire es responsable de un gran número de muertes y de una mayor incidencia de enfermedades respiratorias tanto en adultos como en población infantil. Las muertes asociadas a la contaminación del aire incluyen, entre otras, asma, bronquitis, enfisema, enfermedades respiratorias, cardíacas y alérgicas. Por otra parte, estudios en los que se hará incidencia en posteriores apartados, podría existir relación con la transmisión y severidad del COVID-19.

1.6 Contexto actual.

Se afronta por tanto una triple correlación entre las temperaturas, la contaminación y la salud, en un contexto tan singular como el actual. Para ello, previamente, cabe establecer una revisión bibliográfica de los distintos análisis, investigaciones, artículos e informes han ejercido como base y motivación para el desarrollo de la hipótesis de partida. De esta forma, se repasará toda la narrativa que sirve como estructura del trabajo final y que ha motivado, en gran medida, la realización de este.

1.6.1 Efecto Isla de Calor y Calidad del Aire.

Se parte con la idea de analizar la distribución espacial de la Isla de Calor Urbana (ICU) en el Área Metropolitana de Madrid. Esto, proviene de un estudio realizado (Zheng et al; 2018) en Beijing (China) en 2018, donde se estipulaba que la contaminación atmosférica causada por partículas finas como el PM_{2.5} y su distribución, tenían relación directa con el efecto ICU en este ámbito.

El análisis culminó en que en el periodo 2013-2018, las concentraciones superficiales de PM_{2.5} promediadas para los sitios urbanos y rurales en Beijing y sus alrededores establecían diferencias significativas entre ambos tanto a escala mensual como estacional. Además, se observó una gran correlación (fig.7) entre este contaminante y la intensidad de las ICU, siendo con la temperatura mínima, la más pronunciada (Zheng et al; 2018).

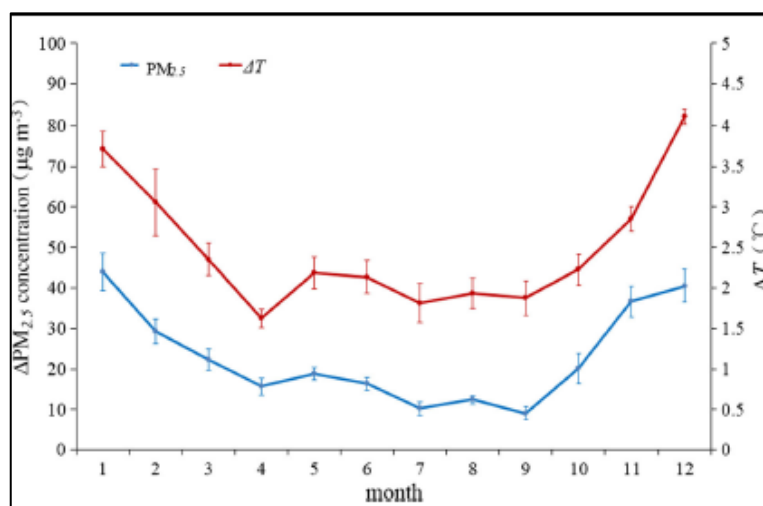


Figura 7. The monthly mean urban-rural difference of PM_{2.5} mass concentration ($\Delta PM_{2.5}$) and the UHI intensity (ΔT) in the Beijing area (Zheng et al; 2018)

Este análisis, permite establecer una primera base sobre una de las variables a tratar, estableciendo relación entre contaminación y el efecto Isla de Calor Urbana (ICU). Sin embargo, en la revisión bibliográfica, que ejerce como punto de partida, existen otra investigación para tener en cuenta de cara al desarrollo final del trabajo.

En otro estudio, realizado en Madrid en 2019, en el que se planteaba la teoría de que mediante diferentes incrementos en el albedo (es decir, la reflectividad de la superficie), de una zona urbana, se verían afecciones de interés en la variabilidad de los niveles de contaminación, concretamente en el Dióxido de Nitrógeno (NO₂).

Como conclusión, se estableció que un cambio en el albedo implica un aumento de la concentración de hasta 20 μg/m³ durante los meses de invierno en área metropolitana. Esto, según la investigación, sucedía a causa de la reducción de la altura de la capa límite atmosférica, ya que la disminución de la temperatura reduce la altura de la capa límite, lo que trae consigo que la dispersión de los contaminantes se reduzca. Debido a esto, la temperatura elevada de los meses de verano favorece una mayor dispersión de los gases contaminantes, provocando que se reduzcan los incrementos en el Dióxido de Nitrógeno (NO₂) (González et al; 2019).

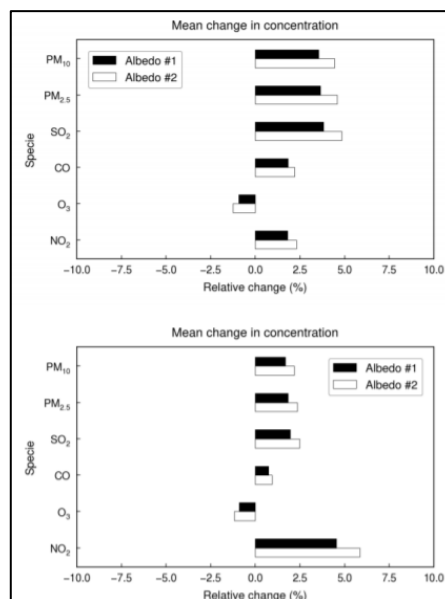


Figura 8. Mean relative change in pollutants concentration after albedo increase for the winter period (up) and for the summer period (down) (González et al; 2019)

Ambas investigaciones, proporcionan una estructura motivacional para el uso de las variables y justifican de alguna manera, el interés por analizar el efecto de la Isla de Calor Urbana (ICU), su distribución espacial, y su correlación o no, con la variable de contaminación asociada, en este caso, al Dióxido de Nitrógeno (NO₂) y Partículas Finas (PM_{2.5}) a partir del uso, tanto de temperatura de superficie como de temperatura del aire (fig.8).

1.6.2 La COVID-19 y su relación con las variables de temperatura y contaminación

La primera investigación, se llevó a cabo en la región italiana de Lombardía, una de las más pobladas e industrializada del país, y que fue el epicentro de la primera ola (marzo y abril de 2020) de la COVID-19 en Italia.

Se trata de una de las zonas más contaminadas de Europa, por lo que se procuró, establecer la asociación existente entre la exposición al Dióxido de Nitrógeno (NO₂) y Partículas Finas (PM_{2.5}) con la incidencia y mortalidad de la COVID-19.

Las conclusiones radicarón en que un aumento de la temperatura media invernal se asoció con una disminución no lineal de la incidencia de la COVID-19 y de la mortalidad por todas las causas. Un incremento de 10 µg/m³ en las concentraciones medias anuales de durante los años anteriores se asoció con un aumento del 58% y del 34% en la tasa de incidencia de COVID-19 y tasa de mortalidad, respectivamente. Del mismo modo, un aumento de 10 µg/m³ de la concentración media anual de PM_{2.5} se asoció con un aumento del 23% en la mortalidad por todas las causas. Se encontró una asociación inversa entre los niveles de (NO₂) y la incidencia de la COVID-19 (De Angelis et al; 2020).

Otro estudio, realizado en Viena (Austria) determinó el impacto de la contaminación atmosférica en la mortalidad relacionada con la COVID-19 y la incidencia de casos notificados de casos notificados, analizando la correlación del número de casos de infección y los resultados con los datos de contaminación atmosférica del año anterior de las poblaciones de 23 distritos vieneses.

Así pues, a partir de una regresión de Cox, y el cálculo de la ratio de peligrosidad se obtuvieron resultados que mostraron que las PM₁₀ y los NO₂ se asociaron significativa y positivamente con el riesgo de diagnóstico de COVID-19 (cociente de riesgos (HR) = 1,44 y 1,16, respectivamente) (fig.9). El NO₂ también se asoció significativamente con la muerte por COVID-19 (HR = 1,72). Incluso dentro de una misma ciudad, los niveles

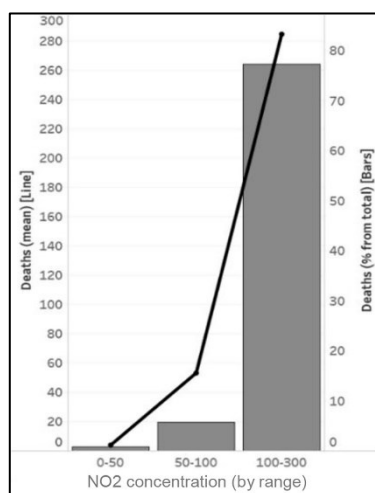
más altos de contaminación atmosférica se asocian con un impacto adverso en el riesgo de COVID-19 (Hutter et al; 2020).

	SARS-CoV-2 Positive			COVID-19 Death		
	HR	95% CI		HR	95% CI	
PM ₁₀ > 20 µg/m ³	1.44	1.25	1.65	1.49	0.73	3.08
NO ₂ > 30 µg/m ³	1.16	1.05	1.29	1.72	1.02	2.90
Percent aged 65+	1.03	1.00	1.06	0.93	0.78	1.10
Percent foreigners	1.01	0.98	1.03	0.92	0.80	1.06
Unemployment rate	1.10	1.03	1.18	1.46	0.97	2.22
Percent university degree	1.05	1.03	1.07	1.14	1.01	1.28
Population density (per km ²)	0.98	0.96	0.99	0.91	0.84	0.99

HR: Hazard ratio; CI: Confidence interval; bold indicates statistical significance ($p < 0.05$).

Figura 9. Effect estimates from Cox regression model (Hutter Et al; 2020)

Además, otra investigación realizada en Italia, Francia y España (Madrid) en 2020, respecto a la influencia del Dióxido de Nitrógeno (NO₂) en la mortalidad por COVID-19 resolvió que los resultados mostraban que de los 4.443 casos mortales analizados, 3.487 (78%) se produjeron en cinco regiones situadas en el norte de Italia y el centro de España. Además, las mismas cinco regiones presentan las mayores concentraciones de NO₂ combinadas con flujos de aire descendentes que impiden una dispersión eficaz de la contaminación atmosférica. Estos resultados indican que la exposición a largo plazo a este contaminante puede ser uno de



los factores más importantes que contribuyen a la mortalidad causada por el virus COVID-19 en estas regiones y quizás en todo el mundo (Ogen et al; 2020).

Figura 10. NO₂ vs. the absolute number of death cases (Ogen et al; 2020).

Por último, otro análisis, llevado a cabo en Wuhan (China), origen de la pandemia, que pretendía correlacionar los distintos contaminantes con la incidencia de la COVID-19 se obtuvieron resultados que en primer lugar encontraban una correlación significativa entre la incidencia de COVID-19 y el índice de Calidad del Aire en Wuhan ($R^2 = 0,13$, $p < 0,05$) y XiaoGan ($R^2 = 0,223$, $p < 0,01$). En concreto, entre los cuatro contaminantes analizados, la incidencia de COVID-19 se correlacionó de forma destacada con las PM_{2,5} y el NO₂ en ambas ciudades.

En Wuhan, la correlación más estrecha se observó (fig.12) entre el NO₂ y la incidencia de COVID-19 ($R^2 = 0,329$, $p < 0,01$). En XiaoGan, además de con las PM_{2,5} ($R^2 = 0,117$, $p < 0,01$) y el NO₂ ($R^2 = 0,015$, $p < 0,05$), también se observó una débil correlación entre la incidencia de PM₁₀ y COVID-19 ($R^2 = 0,105$, $p < 0,05$). Además, la temperatura es el único parámetro meteorológico que se correlaciona constantemente con la incidencia de COVID-19 tanto en Wuhan y XiaoGan, pero en una correlación inversa ($p < 0,05$) (He Li et al; 2020).

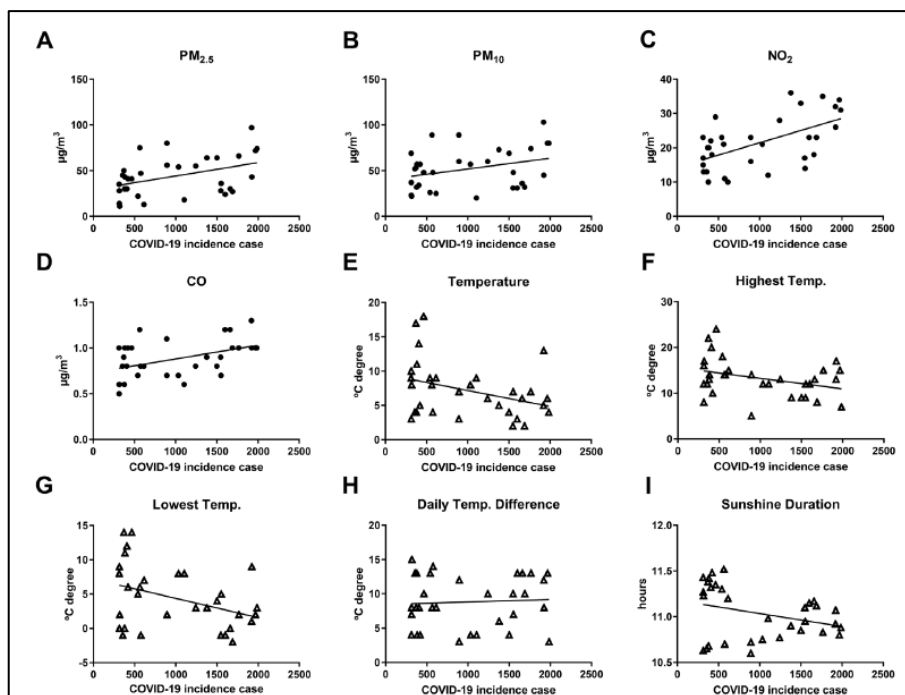


Figura 12. The correlation between daily COVID-19 incidence and ambient air pollution/five meteorological parameters in Wuhan. (He Li et al; 2020)

La revisión bibliográfica de todas las investigaciones mencionadas establece la base para llevar a cabo el estudio de los distintos análisis e interrelaciones a realizar en todas las variables: Isla de Calor Urbana (ICU), COVID-19 y contaminación.

1.7 Descripción del estudio.

El estudio, surge a partir de un contexto que implementa nuevas formas de análisis de la física de las áreas urbanas. La COVID-19 ha replanteado la forma de hacer ciudad, de su diseño, sus hábitos. Aquí, es donde el concepto de “Smart” comienza a tomar, si cabe, mayor protagonismo que el que poseía hasta la fecha. Las cualidades por las que se define una Smart City serían productividad, sostenibilidad económica y ambiental siendo el ciudadano centro de ese crecimiento (Sikora-Fernández, 2017).

Sin embargo, no se trata de que la ciudad sea inteligente, sino de cómo es el desarrollo de su gestión, siendo esta, la que debe ser inteligente. La COVID-19 ha resaltado este concepto, pese a que el reto sigue siendo el mismo, bienestar social, crecimiento económico y sostenibilidad medioambiental, este último ha tomado una mayor importancia debido a que las ciudades generan en torno al 60% de las emisiones globales de contaminantes (Gases de Efecto Invernadero). Existe ahora, la necesidad obligada de una gestión conjunta, los departamentos de cada ciudad deben tener una colaboración multiescalar y fluida de manera que se deje de tratar la ciudad como un conjunto de apartados separados y no interrelacionados entre sí.

La pandemia ha puesto de manifiesto que es el gestor de las ciudades el que es inteligente o no, y esto supone un reto, ya que hemos observado como se han exacerbado problemáticas como la contaminación, la brecha social y económica etc. En este contexto un análisis relacional de variables como la contaminación, el efecto Isla de Calor y la Covid-19 permite, de alguna forma, un principio de gestión conjunta, estableciendo el guion futuro que ayude a afrontar riesgos futuros y cuál es el camino que tomar a nivel urbano en los próximos años. (Nemecio y Tobón, 2021)

En el estudio que se muestra a continuación, se han tomado datos de 2019 y 2020, en referencia tanto a la temperatura mínima, la contaminación y el tratamiento de imágenes de satélite, en el caso del COVID, los datos se restringen hasta diciembre de 2020. Estos datos, como se verá en el apartado metodológico, se encuentran en muchos casos en formato horario y diario, por lo que el tratamiento ha sido meticuloso.

Se han utilizado softwares de distinta índole para desarrollar el tratamiento de los datos y obtener los resultados, entre ellos los Sistemas de Información Geográfica (SIG), ArcMap 10.7.1 y ArcGIS Pro, y el software para el procesado de imágenes geoespaciales y teledetección ERDAS IMAGINE 2020. Se han usado diversas herramientas, que serán tratadas con más detalle en siguientes apartados, desde geoestadística, índices de vegetación (NDVI)... tanto ráster como vectorial. En conclusión, se trata de mostrar la aplicación de distintas herramientas para dar respuesta a los distintos planteamientos.

En este sentido, la importancia de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) toma mayor valor, ya que estos permiten monitorizar variables y establecer modelos predictivos. La importancia de los SIG radica en cuestiones tales como la posibilidad de realizar un gran número de manipulaciones, como las superposiciones de mapas de forma rápida y precisa, las transformaciones de escala, la representación gráfica y la gestión de bases de datos, así como su administración y mantenimiento. Esto, nos ha permitido conocer la actualidad de la pandemia, el estado de la calidad del aire en Madrid tanto pasado como futuro, y analizar multitud fenómenos.

Para ello, es preciso reivindicar el papel del geógrafo como factor clave en el conocimiento multidisciplinar de las distintas variables y factores que afectan a las áreas urbanas.

El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) es una herramienta fundamental debido a su capacidad de análisis de datos y de gestión de estos, se tratan de un instrumento primordial en la gestión territorio, en cualquiera de las vertientes de este, permitiendo un tratamiento multidimensional y multiescalar que permite la interrelación de problemas para ser tratados como conjunto y mediante estrategias comunes que puedan establecer soluciones a los mismos. (Olaya, 2009)

1.8 Hipótesis de Partida.

La pandemia generada por el virus SARS- CoV- 2 causante de la enfermedad COVID-19, ha tenido un gran impacto a nivel global, sin embargo, su incidencia se ha elevado exponencialmente en las grandes urbes mundiales, aumentando su virulencia en lugares con mayor densidad de población (Domingo, J, 2020). La relación dada entre una enfermedad de carácter respiratorio y ámbitos superpoblados como las grandes ciudades es evidente, a mayor densidad de población, mayor movilidad y capacidad tanto de transmisividad del virus, así como de mayor mortalidad ya que afecta a un grupo poblacional más amplio, con mayores posibilidades de llegar a los grupos que entrañan riesgo alto de sufrir complicaciones a causa de la COVID-19.

En España, esto no es diferente, las regiones más pobladas que contienen los grandes núcleos poblacionales son las que más afectadas se han visto por la pandemia. La mayoría de los casos confirmados se han dado en estos lugares, siendo la Comunidad de Madrid una de las más afectada.

Además, si se realiza el análisis en cuanto a la tasa de mortalidad observada, encontramos una tendencia parecida. La Comunidad de Madrid ha sido también la que mayor número de fallecidos ha tenido desde el comienzo de la epidemia en marzo de 2020 (Ministerio de Sanidad, 2021)

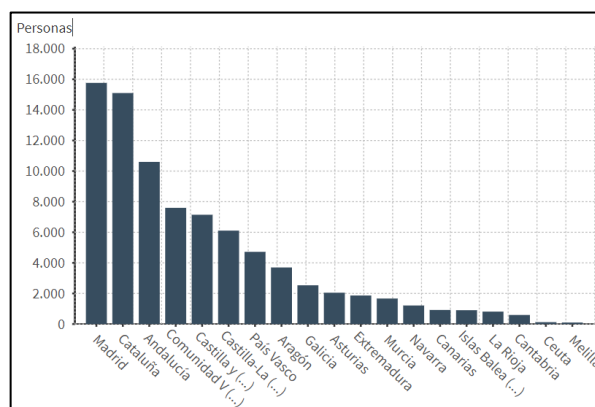


Figura 12. Fallecidos por CCAA. Fuente: Ministerio de Sanidad, Servicios Sociales e Igualdad.

Como se puede observar (fig.12-13), existe una correlación entre el número de casos y la mortalidad por el virus. A mayor número de casos, mayor número de fallecidos.

Se parte, por tanto, de un argumento base que refiere a que las grandes ciudades y zonas urbanas extensas se ven más afectadas por el virus que las áreas no urbanas. (Hernández et al, 2020) Sin embargo, más allá de

las distintas relaciones causa-efecto sanitarias, existen otras variables que pueden dar lugar a que este fenómeno se de en esta forma y no con otra distribución espacial. Más allá de variables como la densidad de población, la movilidad, existen otros factores susceptibles de análisis, que pueden afectar tanto a la transmisión como a la mortalidad por COVID-19. Como se ha mencionado en la introducción a este estudio, el empeoramiento de la calidad del aire tiene relación con un aumento en la mortalidad y aparición de enfermedades respiratorias. Esto se da tanto en países desarrollados como en subdesarrollados. Anteriormente hemos visto que la estimación de la OMS, supera los 4 millones de personas fallecidas anuales a causa de la contaminación, esta mortalidad, se debe, en muchos casos a la exposición a partículas pequeñas ($PM_{2.5}$), que causan enfermedades cardiovasculares y respiratorias y dañan el sistema inmunológico.

Además, según Madrid Salud, respirar niveles elevados de Dióxido de Nitrógeno (NO_2) puede producir irritación en los pulmones y disminuir la función pulmonar, así como disminuir la resistencia a infecciones respiratorias. Y es que la irritación que provoca este contaminante se relaciona con un aumento de la mucosidad de las vías altas respiratorias, lo que puede hacer aumentar las infecciones respiratorias y reagudizar los síntomas de pacientes con enfermedades crónicas respiratorias, asmáticos y alérgicos. De hecho, existen estudios científicos, que veremos posteriormente, que relacionan la exposición a NO_2 con una mayor incidencia de enfermedades respiratorias. (Madrid Salud, 2019)

CCAA	Totales
Total	4.804.424
Ceuta	7.095
Extremadura	98.073
La Rioja	38.561
Melilla	10.374
País Vasco	250.666
Cantabria	43.922
Baleares	94.615
Navarra	80.834
C. La Mancha	227.764
Andalucía	777.299
Madrid	867.974
Galicia	179.283
Murcia	135.965
C. León	292.646
Aragón	156.190
Cataluña	886.082
C. Valenciana	496.481
Canarias	90.700
Asturias	69.900

Figura 13. Casos por CCAA.
Fuente: Ministerio de Sanidad

La actualidad y origen reciente de la COVID-19 genera interés en su relación con los contaminantes y la calidad del aire y en este caso, Madrid y su área metropolitana pueden ser un óptimo campo de estudio para llevar a cabo el análisis de la posible correlación entre ambas variables.

Sin embargo, la contaminación posee un posible gran aliado en las grandes zonas urbanas, la Isla de Calor Urbana (ICU), (Fernández García, 2005) que como se ha mencionado, provoca un aumento de las temperaturas en el centro de las ciudades respecto a la periferia y se produce “debido por la acumulación de calor proveniente de la radiación solar en los materiales presentes en las distintas superficies de la ciudad, además de por el calor antropogénico: las calefacciones, el tráfico, etcétera”. (Sánchez-Guevara, 2017)

Este calor no se disipa debido a la barrera que forman las partículas que se encuentran en suspensión en el aire, así como por la ausencia de ventilación en el interior de la trama urbana. El resultado es un aumento de la temperatura en los centros urbanos que además cuenta con un aliado: la contaminación. “Si tenemos una película de micropartículas en el ambiente –sean del tipo que sean–, el calor de la radiación solar no puede salir a la atmósfera; son dos fenómenos que se retroalimentan”. (Sánchez-Guevara, 2017)

Por tanto, es pertinente formular un planteamiento que intente dar respuesta a las siguientes preguntas:

- ¿Existe relación entre el Efecto Isla de Calor y la contaminación por Dióxido de Nitrógeno (NO_2) y $PM_{2.5}$?
- ¿Cuál es la correlación entre la calidad del aire y la COVID-19?
- ¿Cómo se comporta la enfermedad en función a la temperatura?

1.9 Objetivos.

El estudio se basa en el análisis de las distintas variables anteriormente mencionadas como la contaminación por Dióxido de Nitrógeno (NO_2) y Partículas en Suspensión ($PM_{2.5}$), los que según el Instituto Global de Salud de Barcelona (ISGlobal) son los que más influencia tienen en la salud humana (Khomenko et al, 2021).

El efecto Isla de Calor Urbana (ICU), posee gran importancia dentro de las dinámicas urbanas, existiendo una retroalimentación con el estado de la calidad del aire, ya que, como se ha mencionado en la introducción, “el resultado de un aumento de la temperatura en los centros urbanos que cuenta con un aliado: la

contaminación. “Si tenemos una película de micropartículas en el ambiente –sean del tipo que sean–, el calor de la radiación solar no puede salir a la atmósfera; son dos fenómenos que se retroalimentan” (Sánchez-Guevara, 2017). En último lugar, se incluye la COVID-19, cuya incidencia y mortalidad, según múltiples estudios, podría tener relación con las dos variables anteriormente expuestas (Wu et al; 2020, Accarino et al; 2020, Domingo et al; 2020).

Esto plantea la posibilidad de realizar un estudio en una gran zona urbana, como es el **Área Metropolitana de Madrid**, que se presenta en el siguiente apartado. Se trata de establecer relaciones entre las distintas variables a analizar, lo cual tiene sus limitaciones, debido en muchos casos a falta de datos o a lo actual de la pandemia, sin embargo, existe la posibilidad de establecer tendencias y correlaciones entre los distintos factores. Así pues, la elección del periodo de análisis, 2019-2020 viene dado por la posibilidad de comparar un año de características normales, con un episodio pandémico, para poder así, observar las diferencias.

Por tanto, se establecen una serie de objetivos principales para dar respuesta a los planteamientos de la hipótesis de partida y que se basan en el análisis de la correlación entre el efecto Isla de Calor Urbana (ICU) y la calidad del aire, en la observación de la influencia que pueden tener los contaminantes en el comportamiento de la COVID-19, comprobando además la importancia de la temperatura en las dinámicas de comportamiento del virus y planteando la posible afección de este a la contaminación mediante la comparación de ambos periodos de tiempo.

Además, se establecen una serie de objetivos secundarios inherentes al análisis de los anteriores.

- **Distribución espacial de la Isla de Calor Urbana (ICU).**
- **Análisis de la temperatura de superficie.**
- **Dinámicas y comportamiento espacial del Dióxido de Nitrógeno (NO₂) y Partículas Finas (PM_{2.5}).**
- **Evolución y afección de la COVID-19, incidencia y mortalidad en el año 2020.**

2. **ÁREA DE ESTUDIO**

El estudio planteado en el ámbito de la geografía física urbana hace precisa la elección de un ámbito en el que llevarlo a cabo, procurando que se den las características necesarias para interrelacionar las distintas variables planteadas en los epígrafes anteriores.

Así pues, la Comunidad de Madrid (fig.14), situada en el centro de la Península Ibérica (40°30'N; 3°40'O) y capital de España, se encuentra configurada en zonas diferenciadas de forma clara debido a las heterogeneidades estructurales de las unidades que la conforman. La urbanización extensiva ha ido en aumento con el paso de los años, pasando de reducirse exclusivamente sólo a la capital (donde aparecía una nítida diferenciación entre la ciudad y su entorno), a la conformación de un área metropolitana

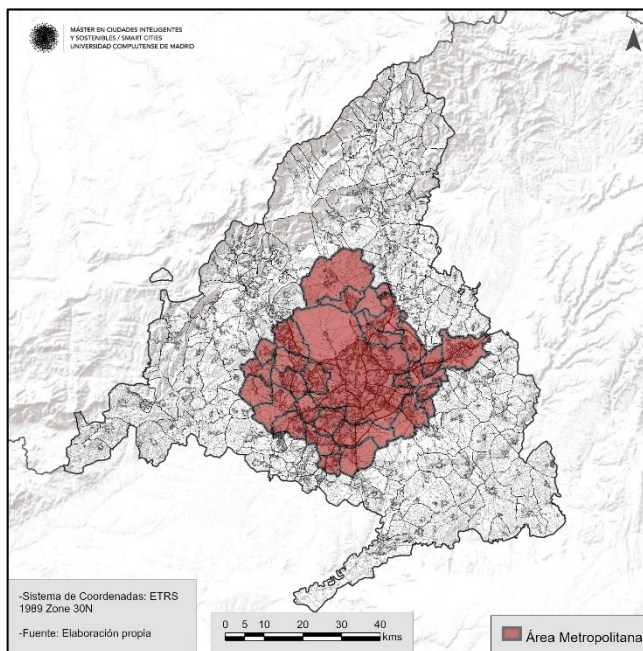


Figura 14. Localización Área de Estudio. Fuente: Elaboración Propia.

funcional con una extensa corona periurbana en la que se incluyen casi todos los núcleos que podrían considerarse rurales (González, 2020).

En concreto, el ámbito de estudio (fig.15) se enmarcará en la denominada **Área Metropolitana de Madrid** (Comunidad de Madrid, 2021), conformada por los municipios de Alcalá de Henares, Alcobendas, Alcorcón, Boadilla del Monte, Brunete, Colmenar Viejo, Coslada, Fuenlabrada, Getafe, Las Rozas de Madrid, Leganés, Madrid, Majadahonda, Mejorada del Campo, Móstoles, Paracuellos del Jarama, Parla, Pinto, Pozuelo de Alarcón, Rivas-Vaciamadrid, San Fernando de Henares, San Sebastián de los Reyes, Torrejón de Ardoz, Tres Cantos, Velilla de San Antonio, Villanueva de la Cañada, Villanueva del Pardillo, Villaviciosa de Odón.

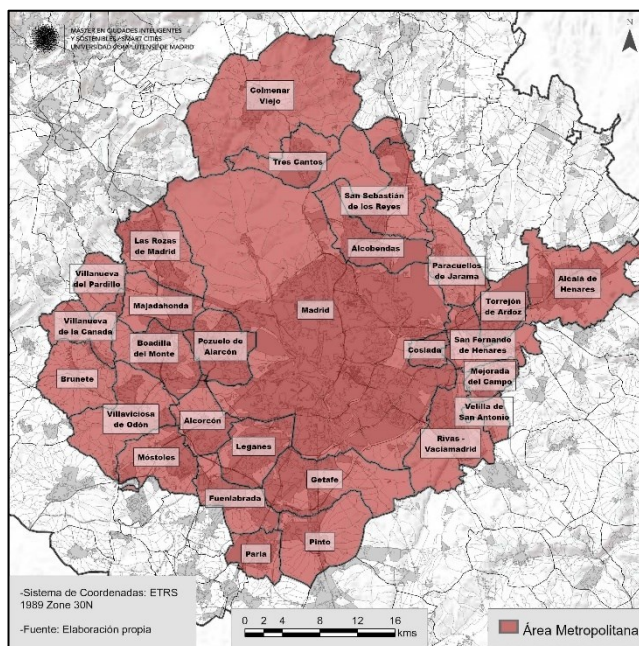


Figura 15. Composición Área de Estudio. Fuente: Elaboración Propia.

2.1 Características generales del Área Metropolitana de Madrid.

2.1.1. Estructura Socioeconómica

Según el Padrón Anual del año 2020 de la Comunidad de Madrid, se trata de un área con una población aproximada de cinco millones y medio de habitantes, siendo la mayor de España y la quinta de Europa sólo por detrás de Londres, París etc.... Posee una superficie de 2.190 km².

Posee una elevada tasa de densidad de población, por encima de los 840 habitantes/km², posicionándose como la decimoséptima en el ranking de España. La mayor concentración poblacional, se da en el Área Metropolitana, donde se concentran la mayoría de los municipios con valores elevados, como por ejemplo Alcorcón, Leganés Madrid, Coslada, etc.... con más de 5.000 habitantes/km².

Madrid es una de las zonas con mayor desigualdad social. Esto, es aplicable al ámbito de estudio donde las rentas más altas, siguen un eje muy claro al noroeste, en municipios como Pozuelo de Alarcón, Boadilla etc....En cambio, las rentas más bajas, se dan en la zona sur y sureste, en municipios como Parla o Fuenlabrada. (Tammaru, 2015)

2.2.2 Estructura territorial

El área metropolitana de Madrid y toda la región se encuentran en una constante evolución. La capitalidad, ser el nodo central del transporte a todos los niveles, el alto grado de urbanización le otorgan un gran dinamismo territorial. En el primer lugar se agregan al municipio cabecera los municipios cuyos residentes se desplazan a trabajar en una determinada proporción al centro. Dichos municipios, junto a Madrid, forman una agregación, la cual ocupa el papel de esta área metropolitana. Es decir, se trata de una expansión a radial a partir de las diversas vías de comunicación, donde se han ido asentando municipios dormitorio de la ciudad central y cuya interrelación y movilidad es muy elevada. (Rubio, 2010)

En cuanto a la ocupación del suelo la superficie urbanizada es de 61, 26% con un total 1320 km² mientras que la no urbanizada representa el 39,74% con un total de 870 km². Se trata, de una superficie ampliamente urbanizada, con un modelo de ciudad muy concreto-región de urbanización expansiva (Pérez González et al, 2020).

2.2.3 Estructura Físico- Ambiental

El área de estudio posee una situación geográfica privilegiada, lo que le concede una variedad de territorios y litología de amplia diversidad característica. Esta variedad plantea una gran diversidad de ecosistemas existentes en este ámbito.

A grandes rasgos, el clima de la Comunidad de Madrid depende de la latitud geográfica en la que se encuentra (entre los 40º y 41º de latitud Norte) y de su posición central en la Península. A nivel local, los parámetros climáticos tienen grandes contrastes: precipitación anual media entre 400 y casi 2.000 mm, temperaturas medias entre 7 °C y 15 °C y absolutas entre -8 °C y 44 °C.

Concretamente el área metropolitana, se encuentra dominada por el clima de estepa local (fig.16), con inviernos fríos o muy fríos, y los veranos con tendencia a ser templados o cálidos. Hay pocas precipitaciones durante todo el año lo que le otorga una clasificación del clima de Köppen-Geiger como una transición entre el Csa (mediterráneo) y el semiárido frío (BSK). (Ezpeleta y Royé, 2021) La temperatura media anual es de aproximadamente de 14.5 °C con una precipitación en torno a los 415 mm.

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Temperatura media (°C)	4.8	6	9.2	12.2	16.7	22.8	26	25.6	20.9	15.1	8.6	5.5
Temperatura mín. (°C)	0.9	1.4	3.8	6.4	10.3	15.7	18.8	18.5	14.8	10.2	4.7	1.8
Temperatura máx. (°C)	9.5	11.4	15	17.9	22.6	29	32.4	31.9	26.8	20.3	13.2	10.1
Precipitación (mm)	41	34	40	47	39	16	6	8	22	61	55	46
Humedad(%)	77%	69%	60%	57%	48%	35%	28%	30%	41%	60%	72%	77%
Días lluviosos (días)	5	4	4	6	5	3	1	2	3	5	5	5
Horas de sol (horas)	5.7	6.8	8.1	9.4	11.5	13	13.1	12.1	10.4	7.8	6.1	5.7

Figura 16. Datos Medios Históricos Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración Propia (1980-2010)

Por otro lado, el relieve, por su variedad y contrastes, es un factor ambiental de importancia. En la Comunidad encontramos dos grandes unidades de relieve: La Sierra (Guadarrama, Somosierra y estribaciones de Gredos) y la depresión o llanuras del Tajo (Campiñas, páramos y vegas) a las que podemos añadir una tercera, la Rampa o zona de transición entre ambas. La altitud máxima corresponde al Pico de Peñalara, con 2.428 m, y la mínima, con 432 m, al cauce del río Alberche en Villa del Prado. El área de estudio se sitúa entre la rampa y la cuenca/depresión.

La red hidrográfica posee un dominio norte-sur y encontrándose el área cruzada por el río Manzanares, limitada por el este por río Jarama y al oeste por Manzanares por el río Guadarrama. Al río Jarama, se le une el Henares, que por su margen derecha cuenta con un amplio desarrollo urbano e industrial

En algunos casos, estas características estructurales compuestas por variables ambientales, urbanas, sociales y económicas influyen en el comportamiento de las elegidas para analizar en este estudio. Para ello, es preciso proporcionar una imagen del comportamiento de dichas variables en el ámbito de estudio y cuál es la causalidad de estas y el comportamiento de los factores que las afectan.

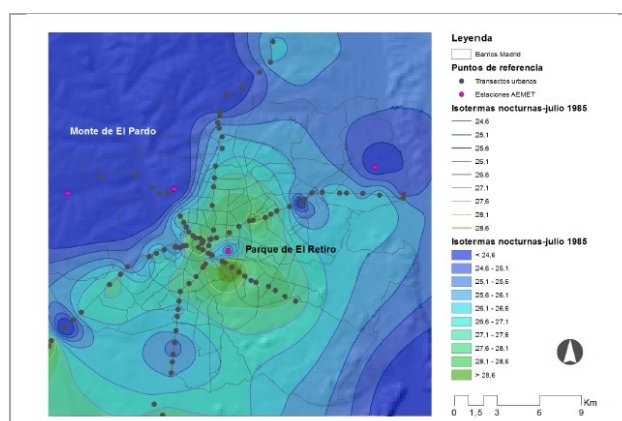
2.2 La Isla de Calor Urbana (ICU) en el Área Metropolitana de Madrid.

En Madrid, la Isla de Calor Urbana (ICU) se da fundamentalmente durante la noche, cuando el calor almacenado por el asfalto y los edificios se remite a la atmósfera en forma de radiación de onda larga y aumenta la temperatura dentro de la ciudad varios grados por encima de la temperatura registrada en las áreas no urbanas.

Este calor acumulado no es disipado debido en parte a la barrera que forman las partículas que se encuentran en suspensión en el aire, así como a la ausencia de ventilación en el interior de la trama urbana, lo que resulta en una elevación de temperaturas en los centros urbanos. Durante el día la mayor capacidad calorífica de los materiales urbanos, así como la morfología urbana que provoca numerosas zonas de sombra y genera una “Isla de Frescor Diurna” manteniendo la ciudad más fría que su entorno, este fenómeno es muy habitual en

las ciudades de interior, no así en las ciudades costeras (Pérez González et al; 2003). Además, este fenómeno se da con mayor frecuencia e intensa durante los periodos cálidos. Cabe añadir, que desde la óptica bioclimática, en Madrid el estrés térmico se da durante las 24 horas del día (Rasilla et al; 2019)

En este sentido cabe mencionar el proyecto MODIFICA (fig.17-18), que comparó datos térmicos de un período de 30 años (1985-2015) determinando que a partir del aumento continuo de la ocupación del suelo por habitante y por vivienda en las últimas décadas, la evolución y expansión de la isla térmica en Madrid no se ha producido de manera homogénea en todo el territorio. Las mediciones realizadas en 1985 permitieron obtener una primera información sobre la configuración de esta en el área estudiada. Los datos recogidos durante los años 2015- 2016 muestran una relación directa entre los últimos desarrollos urbanos, impulsados principalmente en la primera década del s. XXI, y las variaciones de temperaturas observadas en diferentes puntos de la ciudad, respecto al año de referencia. (Román et al; 2017)



Las características climáticas de Madrid provocan que se dé con asiduidad el fenómeno de la inversión térmica, que ocurre normalmente en periodos anticiclónicos (época sin precipitación y con grandes heladas en el territorio) cuando la superficie se enfría rápidamente por radiación, siendo por esto, por lo que tiene cierto componente estacional. El aire se mueve constantemente y las capas que lo forman suelen ordenarse por su temperatura, con las más frías circulando en la parte alta de la atmósfera y las más calientes, abajo. Cuando ese ciclo de movimiento se interrumpe, se forma una capa de aire frío que queda inmóvil sobre el suelo e impide la circulación atmosférica. El fenómeno se produce con más frecuencia en las noches despejadas de invierno, cuando el suelo ha perdido calor por radiación y las capas de aire cercanas a él se enfrían más rápido que las capas superiores.

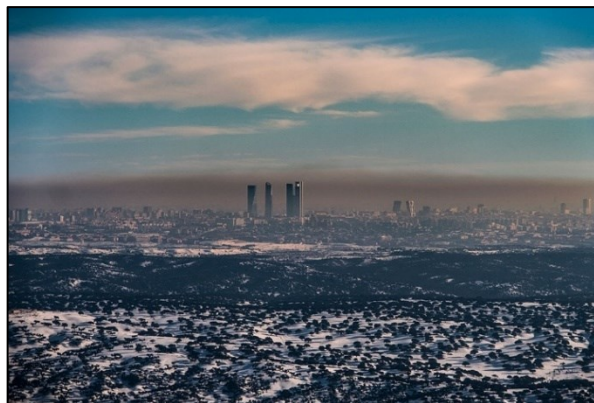


Figura 19. Capa de contaminantes en Madrid. Fuente: Pedro Armestre

Cuando el aire se mueve con normalidad hace circular grandes cantidades de polvo, humo y partículas suspendidas, eliminando la contaminación y limpiando la atmósfera de manera natural. Por eso, cuando la inversión térmica inmoviliza las capas inferiores cercanas al suelo sobre una ciudad, quedan atrapados los contaminantes suspendidos y la población se expone a respirar un aire más contaminado de lo normal.

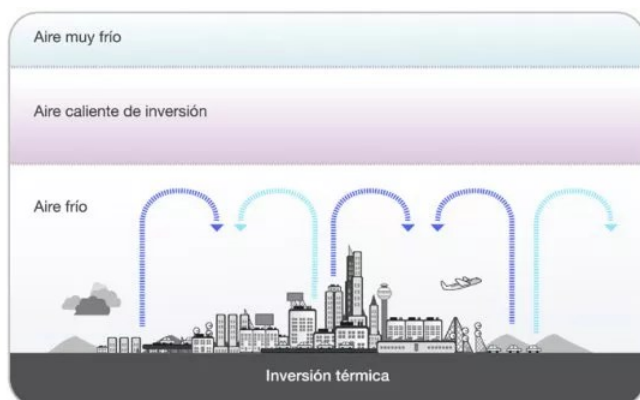


Figura 20. Inversión Térmica. Fuente: Medio Ambiente Madrid

Es de reseñar, además, que la pendiente y el relieve de Madrid y de algunas poblaciones de la Comunidad, influyen notablemente en la eliminación de los contaminantes. Si una ciudad o población dispone de una estructura en forma de valle, en caso de inversión térmica, los contaminantes tienen mayor dificultad para su eliminación. (Moreno Jiménez y Méndez Arranz, 2020)

2.4 La COVID-19 en el Área Metropolitana de Madrid.

El virus **SARS-CoV-2**, causante de la enfermedad COVID-19 ha afectado de mayor manera, como se ha mencionado, a las grandes áreas urbanas. Esto es debido a la mayor movilidad y densidad de población, lo que provoca que el patógeno tenga mayores posibilidades de transmisión comunitaria en este tipo de territorios.

A nivel general, la Comunidad de Madrid, como se ha mencionado, ha encabezado el ranking de casos confirmados por PCR durante la pandemia. Actualmente sólo Cataluña supera a Madrid que cuenta con más 800.000 casos confirmados desde marzo de 2020. Además, es el territorio con mayor número de fallecidos de España con más de 15.500.

La movilidad, la morfología urbana y la mayor densidad de población hacen que la zona más afectada por número de casos y fallecimientos sea el área metropolitana de Madrid (Tejero y Morollón, 2021). Esto hace del ámbito de estudio, una zona de gran valor para la realización del análisis.

3. METODOLOGÍA

La utilización de distintas técnicas, softwares y fuentes de datos ha permitido llevar a cabo un estudio preliminar que ha permitido conocer distintas herramientas aplicables a multitud de análisis futuros. Por ello, en este apartado, se va a llevar a cabo una exposición de todos los recursos utilizados.

3.1 Datos abiertos y fuentes. La importancia de la información accesible.

En las últimas décadas, la ciudad inteligente ha dejado de ser una quimera para convertirse en una realidad que empieza a ser tangible en algunos aspectos. Para su gestión y funcionamiento la importancia del dato es fundamental, entre ellos los de carácter abierto. La existencia, cada vez más habitual de datos en abierto, de libre disponibilidad y acceso universal, que permiten su reutilización y redistribución así como el cruce de distintas variables hace posible realizar análisis que sean útiles para el ciudadano y para la gestión política y territorial.

La ciudad como núcleo urbano es una gran generadora de datos y las nuevas tecnologías nos han permitido ampliar el zoom y disminuir la escala. El cambio de la perspectiva dinámica de las ciudades, sus distritos y barrios, es posible gracias al uso de estos. A partir del Big Data se consiguen herramientas de alta utilidad para la construcción de nuevos modelos urbanos, en los que la sostenibilidad y la eficiencia de los recursos es un pilar fundamental para regeneración de las grandes áreas urbanas. El Big Data proporciona herramientas analíticas que permiten identificar patrones, correlaciones y fenómenos en la dinámica de las ciudades, para así empezar a actuar en su beneficio. (Velazco y Porras, 2016)

Muchas ciudades españolas tienen ya servicios o plataformas de Open Data que son verdaderos aceleradores de innovación y permiten focalizarse en los problemas de las grandes ciudades y analizar mejor las soluciones. En este caso de estudio, Madrid es una de las que mayor infraestructura de datos abiertos posee.

Para este análisis se han utilizado multitud de fuentes de datos provenientes de plataformas:

- En materia de los análisis de temperatura del aire, los datos tienen origen en la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET <http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos>) y la web Meteoclimatic (<https://www.meteoclimatic.net/>) de la cual se han solicitado datos de estaciones que estuvieran certificadas y verificadas. Esta selección fue precisa debido a que eran necesarias para realizar los procesos de interpolación que se describen a continuación, comprobando que la Organización Meteorológica Mundial (OMM) da como útiles estas estaciones si tienen verificación.
- En referencia a la temperatura de superficie, las imágenes analizadas han sido obtenidas de la plataforma EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) perteneciente al Servicio Geológico de los Estados Unidos.
- En cuanto a los datos de contaminación por NO₂ y PM_{2.5}, han sido obtenidos del Portal de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Madrid (<https://datos.madrid.es/portal/site/egob>) y de la Comunidad de Madrid (<https://www.comunidad.madrid/gobierno/datos-abiertos>)
- Los datos necesarios para el análisis de la COVID-19 provienen del Portal de Datos Abiertos de la Comunidad de Madrid y del Ministerio de Sanidad ([Ministerio de Sanidad](#))

Es de vital importancia que la información sea procedente de fuentes oficiales y verificadas para que el análisis sea veraz.

3.2 Los Sistemas de Información Geográfica como herramienta fundamental.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una herramienta fundamental en la cotidianidad de los entornos urbanos, ya que nos permiten realizar análisis actuales y futuros, resolviendo problemáticas a múltiples escalas desde lo global a lo local, y poder obtener respuestas para aplicar estrategias en función de los distintos escenarios planteados.

En este sentido, los SIG han sido de gran ayuda en lucha contra el cambio climático, ya que a través de un solo espacio, es posible la gestión, el análisis y la visualización de datos muy diversos, haciendo más sencilla la comprensión general y la toma de decisiones (Holgado y Bustamante, 2015).

Dentro del análisis realizado, ha sido clave para conocer y darle visualización espacial a aspectos como la temperatura, o la determinación de la concentración de los diferentes contaminantes atmosféricos del área metropolitana de Madrid. En este sentido la aplicación de software de teledetección ha sido clave para conocer la temperatura de superficie y ha permitido ampliar el espectro de herramientas utilizadas.

Sin embargo, el contexto pandémico generado por la COVID-19 ha permitido dar mayor valor a los SIG ya que se han convertido en una herramienta fundamental para el control y conocimiento de la pandemia. La visualización y análisis de datos para comunicar la tendencia, donde se sitúan los principales focos y la evolución en incidencia del virus será aplicable a otras enfermedades. Además el análisis espacial otorgará soporte técnico a la toma de decisiones futuras en situaciones de emergencia sanitaria.

Es posible definir que ha surgido la denominada epidemiología geográfica, donde la ubicación de una enfermedad es una variable explicativa, ya sea porque refleja un elemento de riesgo determinado ambientalmente o porque las personas con factores de riesgo conviven en una zona concreta. No se puede hablar del origen de la aplicación de la cartografía y la subyacente idea de los SIG, sin hablar de salud, y en esto el precursor fue el Doctor John Snow que determinó la causa de la epidemia por cólera en Londres el año 1854 mediante el estudio de la distribución espacial de los enfermos. (fig.21)

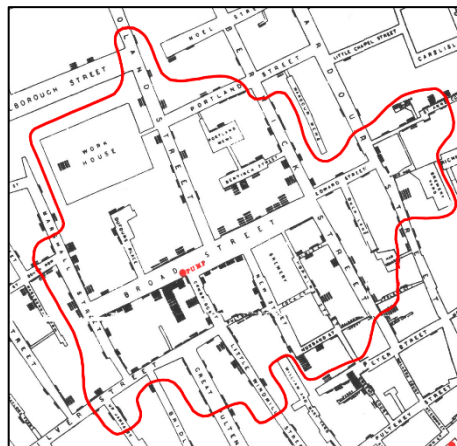


Figura 21. Cartografía Dr. Snow. Fuente: Cuaderno de Cultura Científica

En el presente estudio realizado, se han utilizado principalmente los siguientes softwares:

- ArcGIS Pro
- ArcMap 10.7.1
- QGIS 3.18.3
- ERDAS Imagine 2020
- SAGA GIS 2.3.2

3.3 Cálculo del efecto Isla de Calor Urbana (ICU) a partir de la temperatura del aire.

Para recabar la información necesaria para la medición de la Isla de Calor Urbana (ICU) en Madrid, en primer lugar fue necesario obtener datos verificados que otorgasen entidad al análisis. Se seleccionaron estaciones de varias fuentes certificadas (Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) Ayuntamiento de Madrid y Meteoclimatic), de las que se descargaron los datos diarios de temperatura mínima pertenecientes a las horas nocturnas, de todos los meses del periodo estudiado (2019-2020) debido a que así se posibilitaba la observación de diferencias entre las temperaturas mínimas de los distintos observatorios fijos. Posteriormente se llevó a cabo una media de cada una de las estaciones para obtener un valor de temperatura mínima mensual de cada observatorio de tal forma que se unificaran los indicadores.

Las estaciones seleccionadas para el periodo 2019-2020 fueron:

Buitrago de Lozoya, Robledo de Chavela, Torrejón de Ardoz, Puerto de Navacerrada, Puerto del León, Colmenar Viejo, Retiro, Ciudad Universitaria, Getafe, Cuatro Vientos, Aeropuerto de Barajas, Aranjuez, Guadalajara, Rivas Vaciamadrid, Arturo Soria, Parque Avenidas, El Goloso, J.M.D. Moratalaz, J.M.D. Villaverde, CM de Acústica, J.M.D Hortaleza, Peñagrande, J.M.D Chamberí, J.M.D. Centro, J.M.D Vallecas,

Matadero, Plaza España, Escuelas Aguirre, Farolillo, Casa de Campo, Plaza del Carmen, Moratalaz, Cuatro Caminos, Ensanche de Vallecas, Plaza Elíptica, El Pardo, Parque Juan Carlos I (Ver Anexo fig.63 - Pag 61).

Sin embargo, si se tomasen como referencia los datos exclusivamente de la estación meteorológica, no se representarían las diferencias espaciales en el clima del ámbito de estudio. Para ello se utilizó interpolaciones para poder observar las tendencias espaciales y poder establecer modelos y posibles correlaciones a nivel territorial y urbano (Bernabé ,2020)

Es preciso generar un ráster continuo de datos desde las muestras obtenidas de cada estación, siendo la interpolación la mejor técnica para conocer el comportamiento espacial variables con información recogida de forma puntual.

Existen varios tipos de interpolación, pero en este caso de estudio se ha seleccionado el llamado método **Kriging** (Krigueado), ya que no sólo se basa en la distancia, si no la estructura interna de los datos y su relación con el espacio, es decir, describe la correlación espacial y temporal de un atributo. Asume que los datos están correlacionados. Se utiliza un criterio de minimización de la varianza, resolviendo un conjunto de ecuaciones de un gráfico, el semivariograma.

La utilización de *Kriging* se basa en su mayor precisión, necesidad de una gran confianza de la información (fuentes oficiales, con datos verificados), permite usarlo cuando existe correlación espacial de los datos y ajustarlo a partir de un semivariograma gaussiano. Además es el más utilizado en publicaciones y análisis científicos.

Hacer interpolaciones a partir de ArcGIS es una de las herramientas fundamentales para la realización de interpolaciones a partir de *Geostatistical Wizard* (fig.22). Sin embargo, no todas las herramientas se encuentran transferidas a ArcGIS Pro, mientras que en ArcMap si están desarrolladas.

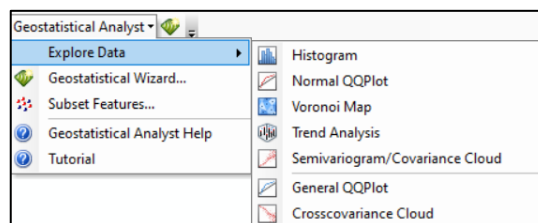


Figura 22. Geoestastical Wizard Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, un resultado obtenido directamente de *Geowizard analysis* para un área con gran diferencia de altitud no puede ser un resultado final en el caso de temperatura. La temperatura varía en función a la altitud, por lo que una interpolación de temperatura con los pasos anteriores dependerá de la altitud de la estación meteorológica. Es necesario trasladar los datos en función a la altitud en función a un Gradiente Térmico Vertical, teniendo en cuenta que al ascender, la temperatura desciende.

Por tanto para estandarizar (Ver Anexo tabla 1 - Pag 59) y reducir el efecto de la altura, se ha obtenido la altitud mínima del Modelo Digital del Terreno para la Comunidad de Madrid que en este caso es de 432 metros y se le ha restado a la altitud de cada estación. Además se ha calculado un Gradiente Térmico Vertical para cada mes del año teniendo en cuenta la fórmula de cálculo:

$$GTV = (\Delta T) / (\Delta H)$$

$\Delta T \rightarrow$ Temperatura de la estación a baja altitud ($^{\circ}C$) – Temperatura de estación a mayor altitud ($^{\circ}C$).

$\Delta H \rightarrow$ Altitud (m.s.n.m.) estación más alta – Altitud (m.s.n.m.) estación más baja.

Una vez calculado se multiplica *Altitud estandarizada (en metros) x GTV en metros*.

Obtenido ese valor se calcula la temperatura estándar adaptada al GTV:

$$\text{Temperatura Estándar: Temperatura} + (\text{Altitud estandarizada (en metros)} \times \text{GTV en metros}).$$

Con los valores ya estandarizados, podemos realizar las interpolaciones mensuales y estacionales para el período de estudio (2019-2020). Para ello, en primer lugar en ArcMap se carga el shp con las estaciones y buscamos la tendencia espacial es decir cómo se distribuye la temperatura a priori. En nuestro caso tenderá en la mayoría de los casos a aumentar hacia la zona central.

Posteriormente procedemos a evaluar la red de muestreo a partir de los polígonos de Voronoi (fig.23), para ver si los datos son adecuados, observar las relaciones de proximidad entre ellos.

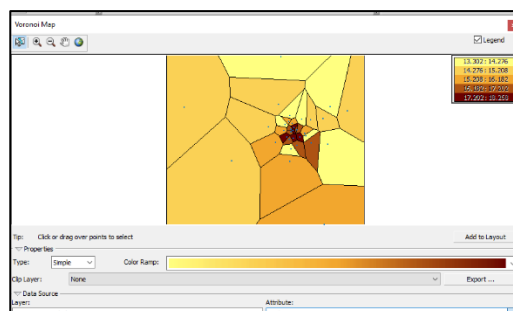


Figura 23. Polígonos de Voronoi. Fuente: Elaboración propia

Después se revisará el histograma (fig.24) que debe tener una forma gaussiana para interpolarse con Kriging, en este caso utilizaremos transformaciones logarítmicas y BoxCox, donde observaremos la distribución de los distintos valores. Se deberá probar hasta que se la forma sea lo más adaptada posible a una campana de Gauss. Esto ha dado lugar a notables ajustes para realizar cada interpolación.

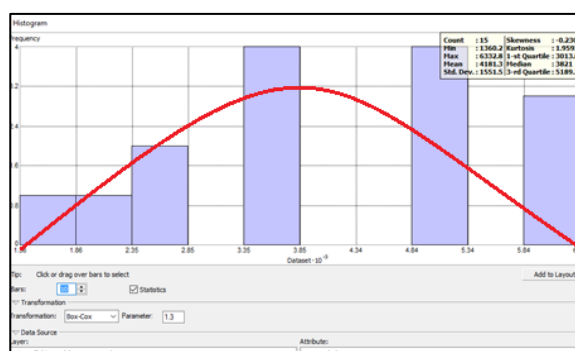


Figura 24. Histograma. Fuente: Elaboración propia

En este sentido debemos analizar la tendencia y conocer el tipo de transformación (fig.25):

- Hay que observar la tendencia en los ejes X-Z y en Y-Z
- Se anotará el grado del polinomio que se observa en la tendencia: Grado I, Grado II, Grado III... Se anotará la de máximo grado de las dos (Ver Anexo tabla 2 - Pag 60).
- Por ejemplo, en la imagen se observa que la tendencia en ambos ejes es de un polinomio de segundo grado.

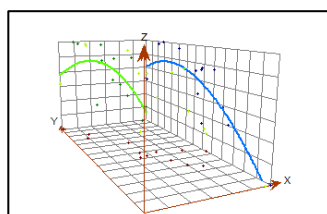


Figura 25. Tendencia. Fuente: Elaboración propia

- Se debe después analizar el semivariograma para ver si existe elevada dispersión en los datos. se trasladan a la herramienta *Kriging*, utilizando para ello el ArcGis Pro debido al mejor desarrollo de esta herramienta.

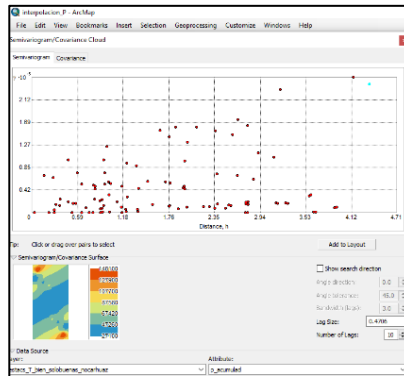


Figura 26. Semivariograma de análisis de los datos. Fuente: Elaboración propia

- Una vez en *Kriging/Cokriging*, se selecciona la capa de información de la que se partirá y el campo de la tabla de atributos con los datos, en el apartado de *Data field*. Se ha optado por *Ordinary Kriging -Prediction*, debido al tamaño de la muestra analizada.
- En este apartado se seleccionan las transformaciones hacia datos gaussianos que se han recogido durante la exploración de los datos: *Boxcox* y *Second Order of Trend* (fig.27).

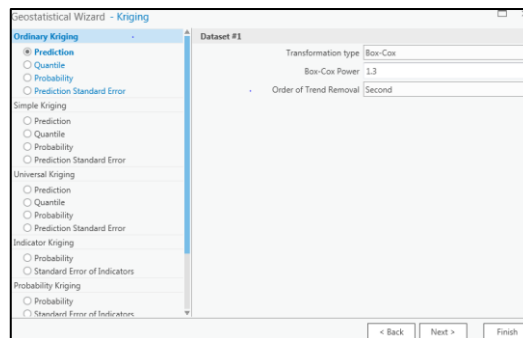


Figura 27. Kriging Fuente: Elaboración propia

- Dentro de *Kriging* se puede elegir entre varios tipos de interpolación, seleccionando *Prediction* en el caso de estudio ya que el atributo no conocido se estima mediante una predicción.
- En esta siguiente pestaña, se valora si la anisotropía (variación de propiedades de elementos según la dirección de análisis) es falsa o verdadera. Si el gráfico tiene forma convexa, la anisotropía es falsa, si tiene forma de un medio cuenco o abierto u otra forma, la anisotropía es verdadera. (fig .28)

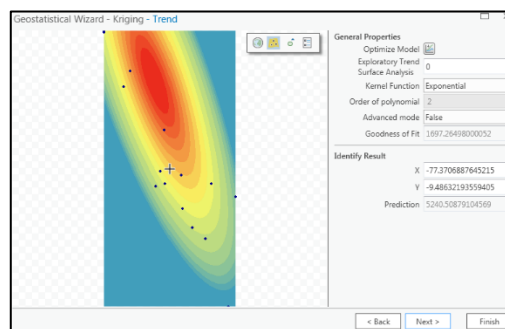


Figura 28. Anisotropía. Fuente: Elaboración propia

- En este momento, se debe observar el semivariograma y ajustar los datos. Las cruces, son el semivariograma experimental que es la media de cada grupo de puntos.). La línea es el modelo del semivariograma que trataremos de ajustar hasta obtener el modelo más indicado para el análisis (fig.29).
- En la parte derecha se alteran los patrones del SV para el ajuste. En el *Semivariogram Map*, se puede modificar el *Search Direction*. El ajuste del SV debe tratar de encajar la línea del modelo con el SV experimental, fundamentalmente con los primeros puntos, pues es lo más cercano. Variar el *Search Direction*, el Modelo, el Lag y también se puede optimizar modelo (fig.29).

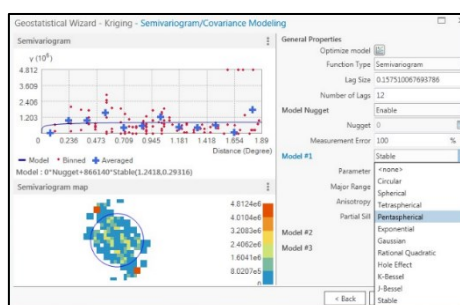


Figura 29. Semivariograma. Fuente: Elaboración propia

- Cuando, como en el caso de estudio se tienen un gran número de datos el ajuste de estos al SV es bastante más sencillo. No es necesario que se ajuste perfectamente, pero sí lo mejor posible.
- El siguiente paso es observar cómo será el resultado. Se debe repetir el resultado si existen “cortes” o líneas rectas claras. Otro error común es los llamados “Bull Eyes”. En el caso de estudio observaremos alguno, pero es debido a los datos y las diferencias reales de temperatura (fig.30).

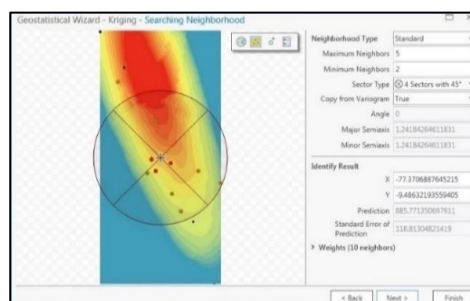


Figura 30. Comprobación de los datos Fuente: Elaboración

- Por último se va a comprobar el error y cuáles de las mediciones se encuentran subestimadas o sobreestimadas. Observamos el resultado con el valor de predicción y después el error estándar para observar si es muy alto en las zonas que tenemos datos o no (fig.31).

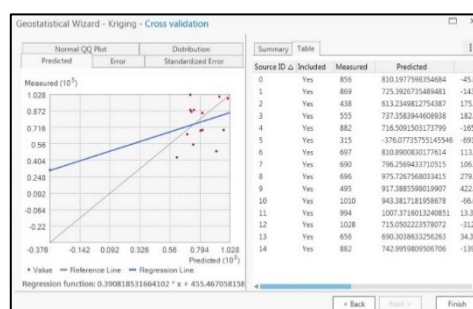


Figura 31. Error Standard. Fuente: Elaboración propia

3.4 Cálculo de la temperatura de superficie en el área metropolitana de Madrid.

Como se ha mencionado en apartados anteriores, era de interés calcular la temperatura de superficie urbana del ámbito de estudio para conocer el comportamiento espacial de esta. La temperatura superficial es de vital importancia en los estudios de climatología urbana, ya que condiciona y modula la temperatura del aire en las capas más bajas de la atmósfera. Para la realización de este cálculo se han utilizado 18 imágenes de satélite pertenecientes a los meses de enero a septiembre del periodo 2019-2020.

Para la obtención de esta variable, se ha establecido un método de cálculo a partir de las imágenes de satélite, las cuales, como se ha mencionado se han obtenido de EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Las imágenes utilizadas han sido las pertenecientes al satélite Landsat 8 (Landsat 8 OLI/TIRS C2 L1), de las cuales se eligieron las mencionadas en el apartado anterior. En pro de la optimización del análisis se escogieron aquellas que cubrieran el área de estudio y además no tuvieran intervalos nubosos, lo que dificultó las posibilidades e impidió obtener imágenes limpias para los meses de otoño. El horario de captación de las imágenes es las 10:00 am. Una vez conseguido este primer punto se procedió a realizar el cálculo con el software de teledetección ERDAS Imagine (Pires, 2015).

De las imágenes descargadas se van a utilizar la banda 10 como banda térmica y las bandas 4 y 5 para el cálculo del NDVI (*Normal Difference Vegetation Index*). Para resolver el planteamiento se ha utilizado la herramienta *Modeler Maker*.

El proceso consiste en calcular en el siguiente orden:

- 1) Radiación TOA
- 2) Temperatura de brillo
- 3) NDVI
- 4) Porcentaje de la vegetación
- 5) Emisividad
- 6) Temperatura superficial

- La **radiación TOA (Top of Atmospheric) o radiancia espectral** (fig.32) se calcula:

$$TOA (L?) = M_L * Q_{cal} + AL \text{ TOA} = 0.0003342 * \text{"Band 10"} + 0.1$$

Donde M_L y Q_{cal} son valores disponibles en el archivo de metadatos de la banda y que se corresponde con el factor de re-escalamiento multiplicativo específico de la misma.

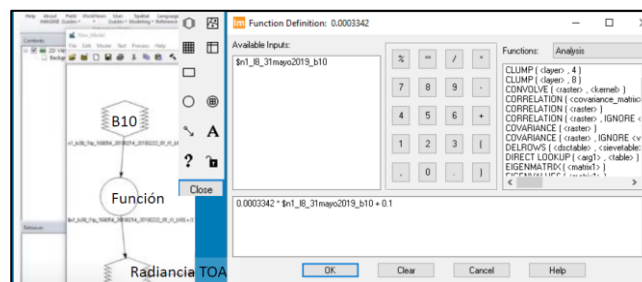


Figura 32. Radiación TOA. Fuente: Elaboración propia

- El siguiente paso es la **conversión de TOA a Temperatura de Brillo** (fig.33) a partir de la fórmula:

$$BT = (K_2 / (\ln (K_1 / TOA) + 1)) - 273.15$$

Dónde TOA es el resultado del anterior proceso, y K_2 y K_1 son constantes de conversión térmica específicas de la banda a partir de los metadatos.

Por lo tanto para obtener los resultados en Celsius, la temperatura radiante se ajusta sumando el cero absoluto (aprox. -273,15°C).Escriba aquí la ecuación.

$$BT = (1321.0789 / \ln ((774.8853 / "TOA") + 1)) - 273.15$$

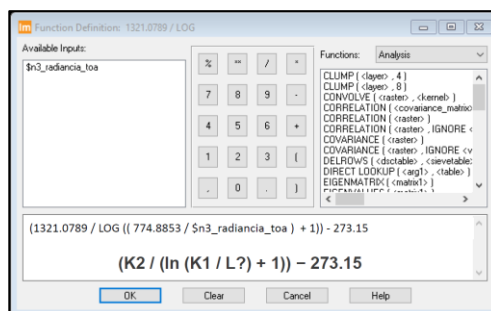


Figura 33. Temperatura de Brillo. Fuente: Elaboración propia

- Posteriormente es preciso calcular el NDVI, para ello se utilizará la fórmula:

$$NDVI = (Banda\ 5 - Banda\ 4) / (Banda\ 5 + Banda\ 4)$$

-El NDVI, es necesario para el cálculo de la Proporción de Vegetación P_v a partir de la fórmula:

$$P_v = \text{Square} ((NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}))$$

Por lo general los valores mínimos y máximos de la imagen NDVI se pueden visualizar directamente en la imagen o en las propiedades del ráster (metadatos) (fig.34).

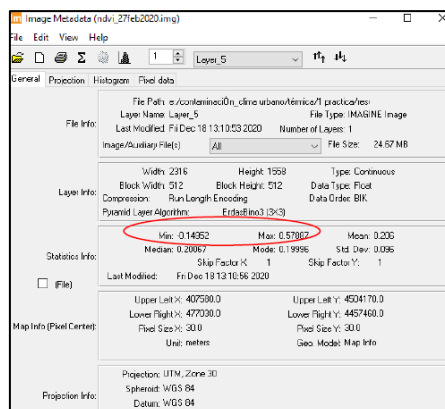


Figura 34. Metadatos. Fuente: Elaboración propia

- Obtenido todo lo anterior, se lleva a cabo el cálculo de la Emisividad (fig.35) a partir de la fórmula:

$$\epsilon = 0.004 * P_v + 0.986$$

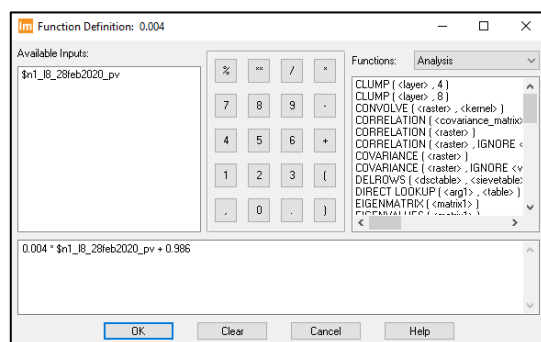


Figura 35. Emisividad. Fuente: Elaboración propia

El valor de 0.986 corresponde a un valor de corrección de la ecuación.

Por último se calcula la Temperatura de Superficie de la tierra (LT) a partir de la fórmula:

$$LT = (BT / (1 + (0.00115 * BT / 1.4388) * \ln(\epsilon)))$$

Como resultado del proceso desarrollado se cuenta con un mapa de temperatura de superficie de la tierra, cabe señalar que no es igual a la temperatura del ambiente.

Una vez realizado el proceso para cada mes, se ha decidido llevar a cabo una media estacional de tal forma que como resultados se obtuvieran cuatro imágenes de temperatura de superficie para invierno, primavera, verano y la media total de estos. Por último se pasaron a ArcGIS Pro para darle una edición correcta y estandarizar la gama cromática a utilizar.

3.5 Medida de contaminación de NO₂ y PM_{2.5}.

La obtención de datos fehacientes respecto a la contaminación del área metropolitana de Madrid, ha conllevado la descarga de estos desde el portal de Calidad del Aire de la Comunidad de Madrid (http://gestionaria.madrid.org/azul_internet/run/j/AvisosAccion.icm) así como desde el portal de Datos Abiertos del Ayuntamiento de Madrid ([Datos Abiertos Calidad del Aire Ayto. de Madrid](#)).

Las estaciones seleccionadas para el análisis fueron diferentes para el NO₂ y el PM_{2.5} debido a que no todas las estaciones toman medidas de ambos contaminantes. Por ello la elección fue:

- **NO₂:** Aeropuerto de Barajas, Alcalá de Henares, Alcobendas, Alcorcón, Algete, Aranjuez, Arganda del Rey, Arturo Soria, Avenida Ramón y Cajal, Barrio de Pilar, Calle Farolillo, Casa de Campo, Collado Villalba, Colmenar Viejo, Coslada, Cuatro Caminos, El Atazar, El Pardo, Ensanche de Vallecas, Escuelas Aguirre, Fuenlabrada, Getafe, Guadalix de la Sierra, Leganés, Majadahonda, Méndez Álvaro, Moratalaz, Móstoles, Orusco de Tajuña, Paseo de la Castellana, Plaza Elíptica, Puerto de Cotos, Pza Carmen, Plaza Castilla, Plaza España, Retiro, Rivas-Vaciamadrid, San Martín de Valdeiglesias, Sanchinarro, Torrejón de Ardoz, Valdemoro, Puente Vallecas, Villa del Prado, Villarejo de Salvanés, Villaverde Alto (Ver Anexo fig.68 - Pag 68).
- **PM_{2.5}:** : Aeropuerto de Barajas, Alcalá de Henares, Alcobendas, Alcorcón, Algete, Aranjuez, Arganda del Rey, Casa de Campo, Collado Villalba, Colmenar Viejo, Coslada, Cuatro Caminos, El Atazar, Escuelas Aguirre, Fuenlabrada, Getafe, Guadalix de la Sierra, Leganés, Majadahonda, Méndez Álvaro, Moratalaz, Móstoles, Orusco de Tajuña, Paseo de la Castellana, Plaza Elíptica, Puerto de Cotos, Plaza Castilla, Rivas-Vaciamadrid, San Martín de Valdeiglesias, Sanchinarro, Torrejón de Ardoz, Valdemoro, Puente Vallecas, Villa del Prado, Villarejo de Salvanés (Ver Anexo fig.72 - Pag 74).

Para el cálculo del PM_{2.5}, en algunos casos ha sido necesario calcularlo a partir de datos de PM₁₀ ya que según un estudio de la Universidad Agraria de Perú (Valdivia; 2016), el cálculo del primero se puede realizar a partir de la reducción a la mitad del segundo.

Una vez obtenidos los datos, se realizó una media mensual para ambos contaminantes de tal forma que se observaran las zonas con mayores valores de contaminación y los meses del año donde mayor incidencia de esta había. Lo anterior, permite visualizar espacialmente la distribución de los contaminantes en el área metropolitana de Madrid.

Para el proceso anterior se ha utilizado el mismo método que para la temperatura del aire a partir de interpolaciones hechas con el método *kriging* en ArcMap y ArcGIS Pro.

En último lugar, para la representación cartográfica y el análisis se ha utilizado la gama cromática establecida en el índice de valores medios anuales de la *Environment European Agency* (<https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/dashboards/air-quality-statistics>) para ambos contaminantes.

Las tablas que muestran los datos de contaminación y detalles del proceso de interpolación por estaciones se encuentran incluidas en el anexo (Ver Anexo tablas 5-7 - Pag 68-73).

3.6 Cálculo de indicadores referentes a la COVID-19 en el Área Metropolitana de Madrid.

Como se ha mencionado, los datos referentes a la COVID-19 se obtuvieron tanto de la Comunidad de Madrid como del Ministerio de Sanidad. Los datos de interés para nuestro estudio eran los fallecidos y la incidencia acumulada por cada 100.000 habitantes en los distintos municipios que formaban parte del área metropolitana de Madrid desde el inicio de la pandemia hasta el 1 de enero de 2021. Para la consecución de resultados ha sido necesario llevar a cabo un análisis estadístico, tanto de la incidencia mensual como de los fallecidos por cada 100.000 habitantes desde el inicio de la pandemia hasta finales de 2020, de tal forma que fuese posible observar que zonas han sido las de mayor afección.

En referencia a la incidencia se lleva a cabo un cálculo estadístico por semanas de tal forma que es posible obtener la totalidad del mes y realizar una comparación con las otras variables. En cuanto a los fallecidos se obtienen los valores totales del periodo (marzo-diciembre 2020) por lo que la comparación será con la media total (anual 2020) de los datos pertenecientes a las otras variables (Ver Anexo tabla 8-9 - Pag 77-78).

La representación cartográfica se ha realizado de forma vectorial, utilizando los valores establecidos en los datos proporcionados por la Comunidad de Madrid (<https://www.comunidad.madrid/covid-19>)

3.7 Correlación de las variables de temperatura y contaminación por NO₂ y PM_{2.5}.

Para intentar establecer una relación entre estas dos variables se realizaron perfiles tanto de temperatura, como de contaminación con ArcMap utilizando los mismos puntos de medición de tal forma que fuera posible establecer una correlación visual entre los mismos.

Para ello se realizaron perfiles Oeste- Este y Norte-Sur en dos escalas distintas, una en la ciudad de Madrid y otra tomando como referencia el área metropolitana de Madrid (Ver Anexo fig.79 - Pag 82).

- **Perfil Oeste-Este ciudad de Madrid (A):** Casa de Campo- Jardines del Moro-Retiro-M-30-Mortalaz-Vicálvaro.
- **Perfil Norte-Sur ciudad de Madrid (B):** Fuencarral-Manoteras-Calle Costa Rica-Calle María de Molina-Paseo del Prado-Planetario-Manzanares-M-40 Peugeot Villaverde.
- **Perfil Oeste-Este Área Metropolitana (C):** Majadahonda- Ciudad Universitaria-Madrid Centro-Wanda Metropolitano-Aeropuerto de Barajas-Torrejón de Ardon-Alcalá.
- **Perfil Norte-Sur Área Metropolitana (D):** San Sebastián de los Reyes- La Moraleja-Santiago Bernabéu-Calle Serrano- Manzanares-Cuatro Vientos- Móstoles- Centro Comercial Xanadú.

La realización de los perfiles permite una comparación a partir de los datos y la posibilidad de observar si visualmente se produce una correlación entre estas dos variables.

3.8 Correlación entre la COVID-19 y las distintas variables.

Para llevar a cabo esta correlación se han realizado análisis espaciales a partir de la generación de cartografía, además, de diagramas de dispersión, con los cuales se establece el coeficiente de correlación entre las dos variables. A partir de los datos almacenados se han realizado distintas comparativas entre la Incidencia Acumulada con las variables de temperatura y contaminación y de los fallecidos por cada 100.000 habitantes con la variable de contaminación.

El diagrama de dispersión se usa comúnmente para mostrar cómo dos variables se relacionan entre sí. De este modo, permite estudiar las relaciones que existen entre dos factores, problemas o causas relacionadas con la calidad, o un problema de calidad y su posible causa. Su objetivo es analizar estas variables para determinar la forma en que se relacionan o qué tan independientes son una de la otra.

Lo que se pretende es establecer, a partir del Coeficiente de Correlación y la tendencia de esta, en qué porcentaje, es posible que exista relación entre las variables ambientales y urbanas, y la expansión de la

COVID-19 en Madrid. Esto implica una dificultad añadida, ya que se trata de un patógeno cuyo comportamiento se ve influido por multitud de factores que no se encuentran recogidos en el estudio, como por ejemplo, las medidas sanitarias aplicadas en cada momento. Esto supone la posibilidad de ampliar el estudio a un espectro de mayor entidad en un futuro

4. RESULTADOS

Una vez obtenida la información y llevados a cabo los distintos procesos, se muestran los resultados obtenidos para cada una de las variables analizadas.

4.1 Isla de Calor Urbana (ICU) en el Área Metropolitana de Madrid.

Para la Isla de Calor Urbana (ICU) se han obtenido mapas mensuales así como perfiles térmicos estacionales del período 2019-2020, consiguiendo medias totales y estacionales de temperatura lo que proporciona una imagen clara del comportamiento espacial de la misma, con una clara tendencia central-sureste (fig.37).

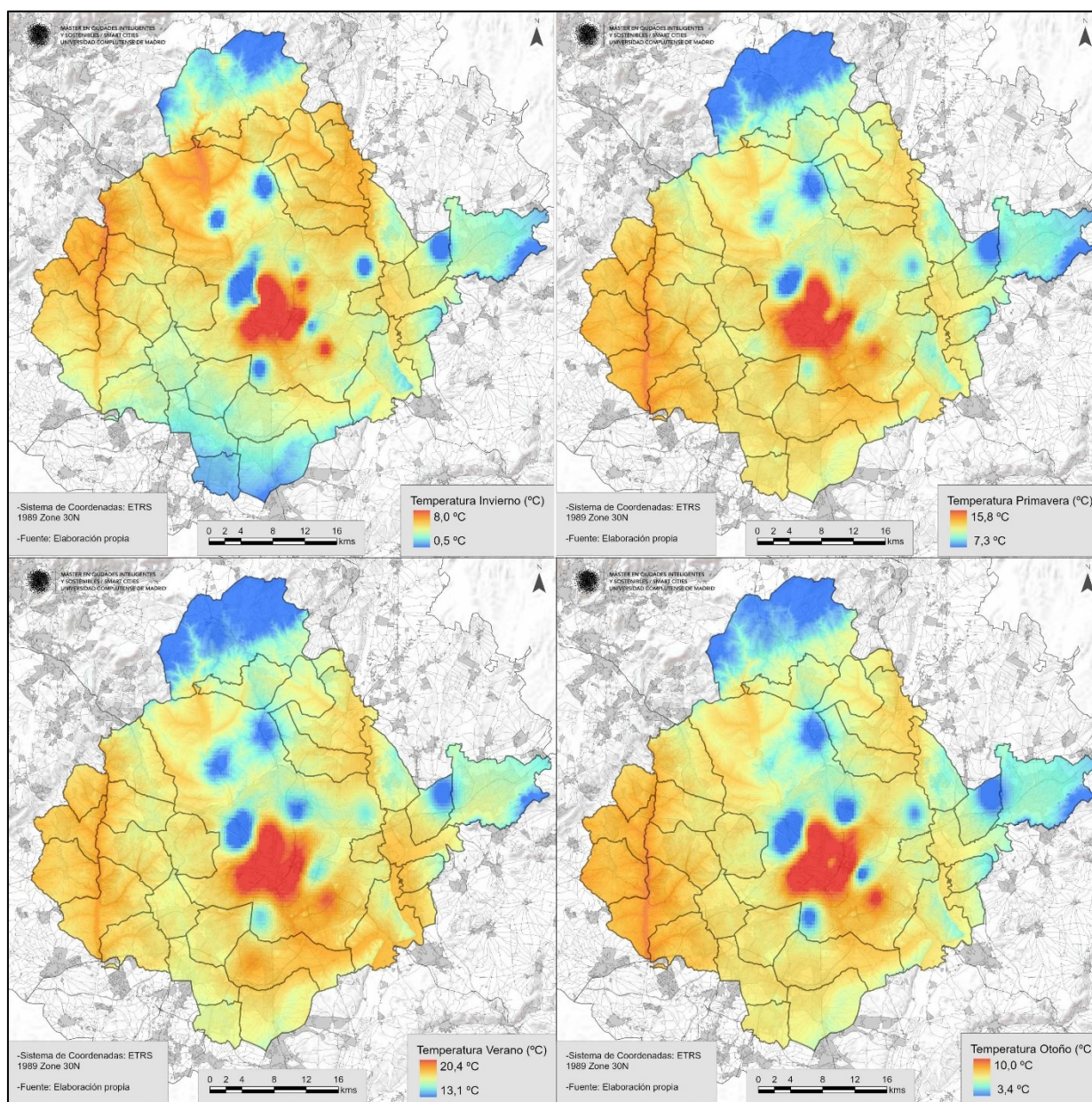


Figura 37. Evolución estacional de Isla de Calor Urbana (ICU) Media del Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar el comportamiento espacial del fenómeno en el área de estudio de tal forma que permite obtener una imagen estática del mismo, estableciendo una tendencia central del aumento de la temperatura y encontrando diferencias de temperatura de más de 8 °C entre zonas como la almendra central y la periferia norte, e incluso entre áreas del centro, donde se hace plausible el efecto a analizar. También es reseñable como existen puntos donde la temperatura se reduce radicalmente en el entorno de la ciudad, respecto a las zonas más afectadas y urbanizadas, que generalmente corresponde a lugares, como la Casa de Campo o El Pardo donde existe una mayor cobertura vegetal o flujos de agua que ejercen como mitigadores y reguladores del fenómeno.

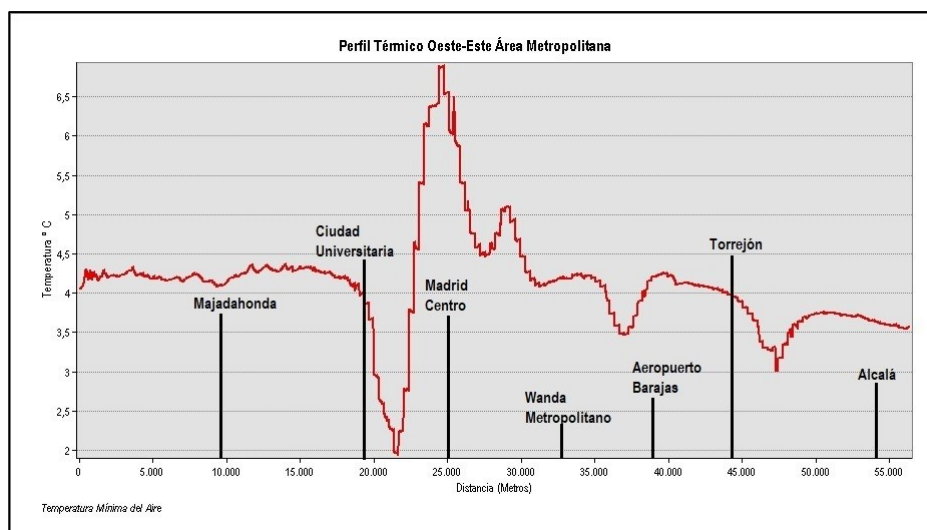


Figura 38. Perfil Térmico Invierno Temperatura (2019-2020) del Oeste-Este Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

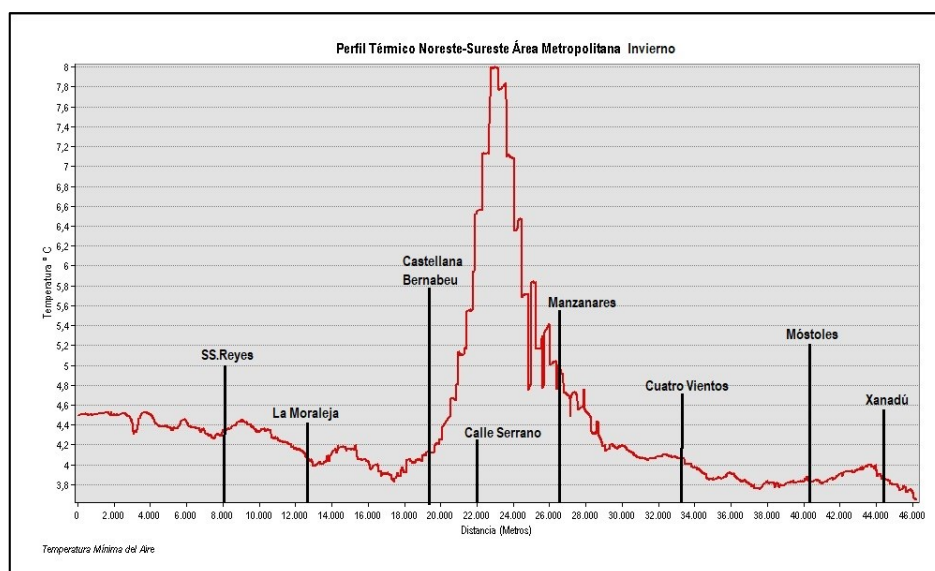


Figura 39. Perfil Térmico Invierno Temperatura (2019-2020) Norte-Sur del Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

En los gráficos (fig.38-39), es destacable como se distribuye la temperatura del aire a lo largo del ámbito de estudio y como se produce un evidente aumento de esta según se produce un acercamiento al centro de la ciudad de Madrid. A la vez es posible observar como la periferia reduce su temperatura respecto a lo anterior. Se observa, por ejemplo, un aumento mayor a 4 °C de diferencia entre zonas como San Sebastian de los Reyes

o Móstoles respecto a la Calle Serrano (fig.39). Esto es posible observarlo también entre Ciudad Universitaria y el distrito Centro donde la diferencia es superior a los 4,5 °C. Se produce un incremento exponencial de la temperatura al entrar en la ciudad central, que se reduce a alejarnos a la periferia. Además, se observan varias caídas en la temperatura correspondientes a los alrededores de Ciudad Universitaria, el aeropuerto Adolfo Suárez - Madrid Barajas y las inmediaciones de Torrejón de Ardoz y Alcalá de Henares. Todas estas caídas de temperatura se producen en áreas poco urbanizadas como la mencionada Ciudad universitaria y el entorno del Río Manzanares; El Parque Juan Carlos Primero y la Terminal de Carga de Barajas; y El Majuelo y Soto Ciudad para el área de Torrejón.

4.2 Temperatura de superficie en el Área Metropolitana de Madrid.

Para la temperatura de superficie se han obtenido a partir de imágenes de satélite (diurnas) perfiles térmicos además de tres mapas estacionales referentes a invierno, primavera y verano, y uno de la media total de las tres estaciones. Esto obedece que no se han podido obtener imágenes de satélite limpias (sin nubes) de los meses pertenecientes a otoño, por lo que el análisis se ha visto limitado. En el mapa (fig.40), podemos observar el comportamiento espacial de la variable de la Temperatura de Superficie en el área de estudio, intuyéndose como la periferia de las ciudades posee mayor temperatura que los propios

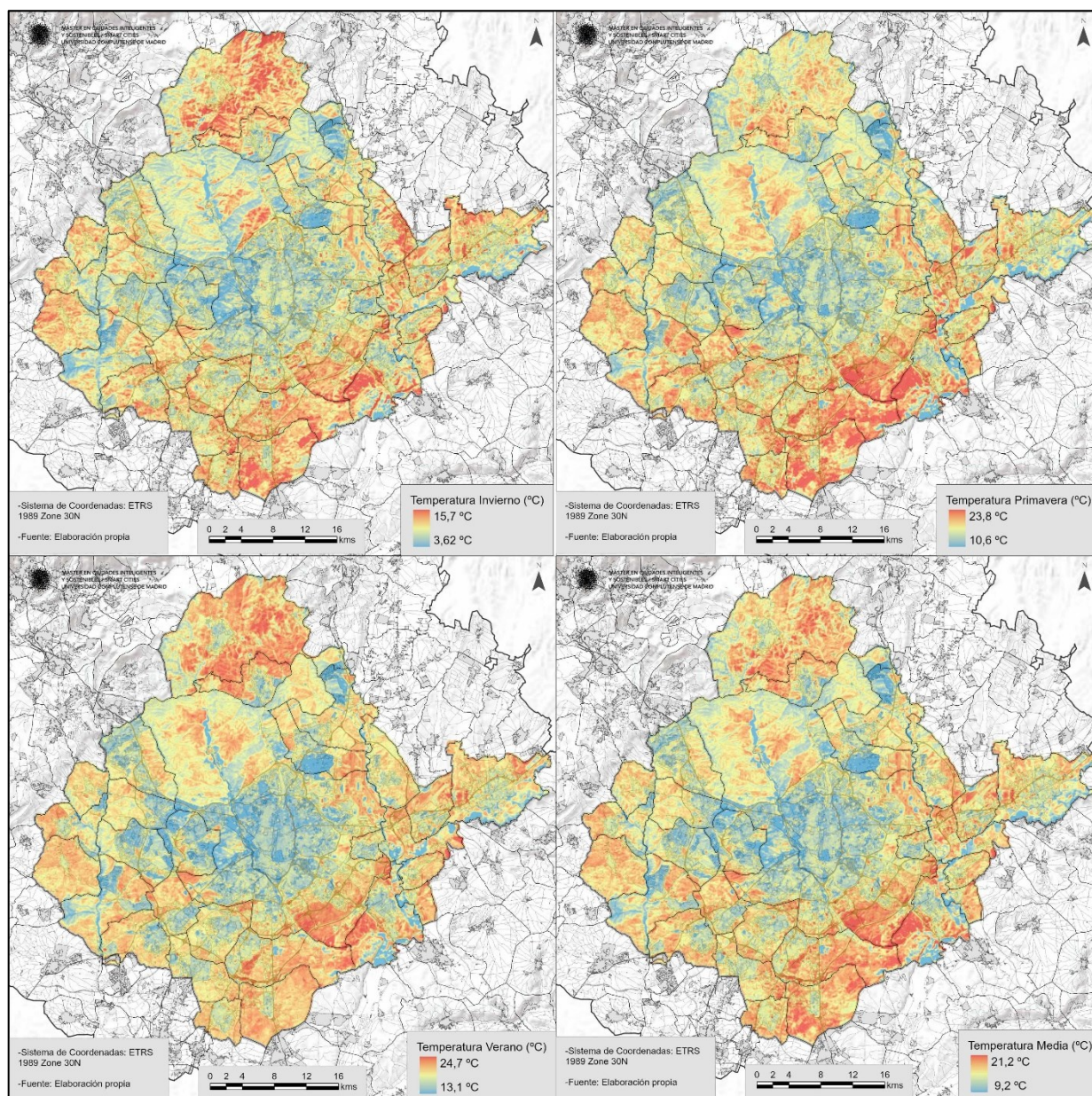
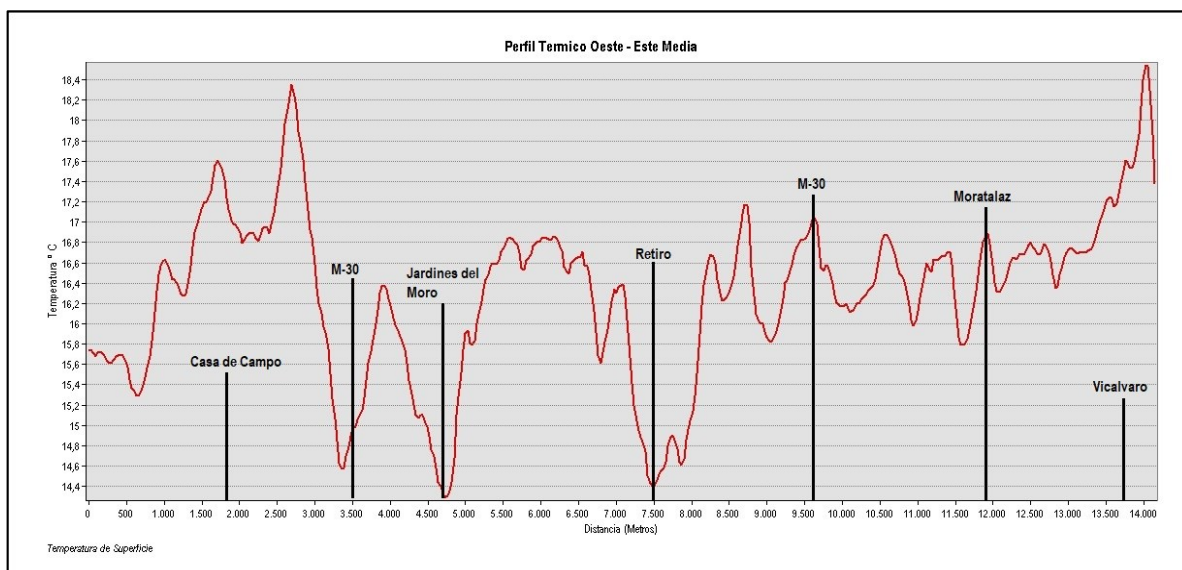


Figura 40. Evolución Temperatura de Superficie del Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

Se puede resaltar que durante el día la mayor capacidad calorífica de los materiales urbanos, así como las múltiples sombras provocadas por los edificios mantienen la ciudad más fría que los alrededores reflejándose de forma evidente la llamada **Isla de Frescor Diurna**. Esto se observa, claramente en todos los municipios de la periferia y en la propia ciudad de Madrid, donde las áreas residenciales se encuentran notablemente más



frías que las áreas industriales o no urbanizadas. Existen, además, diferencias entre el norte y el sur intuyéndose el primero como más cálido que el segundo sobre todo en verano e invierno, en primavera esa diferencia no es tan reseñable, lo que se deba, probablemente a la irradiación.

Figura 41. Perfil Térmico Temperatura de Superficie Oeste-Este del Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

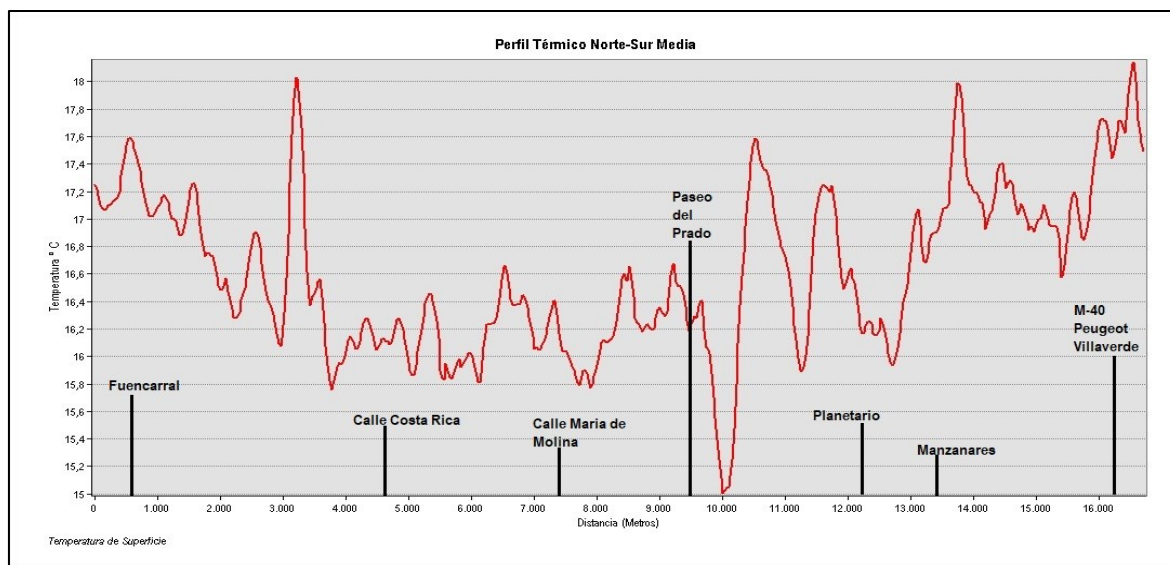


Figura 42. Perfil Térmico Temperatura de Superficie Norte-Sur del Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

Los perfiles (fig. 41-42) confirman lo visto en la cartografía, donde en este caso, se observa un incremento de la temperatura, cuanto mayor es el alejamiento del centro urbano, confirmando lo visto en las imágenes de satélite y reduciéndose la temperatura entre 1 y 3 °C entre las áreas urbanizadas y las no urbanizadas. Estas zonas urbanizadas absorben más calor lo que posteriormente tendrá relación con la Isla de Calor Urbana (ICU) como se observará en el análisis.

En el perfil Oeste - Este es posible apreciar en gran medida la influencia de los parques en el descenso de la temperatura, con la excepción de la Casa de campo, en la cual se observa una alta temperatura superficial. Las grandes carreteras y avenidas parecen aumentar la temperatura con la excepción de la M-30 Oeste (Km. 23), donde la temperatura sufre un profundo descenso, el cual coincide, también con la existencia del Río Manzanares. En este perfil, es posible observar que las zonas con mayor nivel de vegetación dentro del ámbito urbano como los Jardines del Moro o el Retiro producen un descenso pronunciado de la temperatura, teniendo en cuenta que uno de los usos más extendidos de la vegetación dentro de la ciudad es el control de la radiación solar.

4.3 Contaminación por NO₂ (Dióxido de Nitrógeno) en el Área Metropolitana de Madrid.

Para obtener resultados acerca del comportamiento espacial del NO₂ ha sido preciso realizar un análisis mensual y estacional (Ver Anexo fig.69-70 - Pag 69-70) que permitiese obtener una imagen clara que explicara las tendencias ocurridas durante los dos últimos años (fig.43).

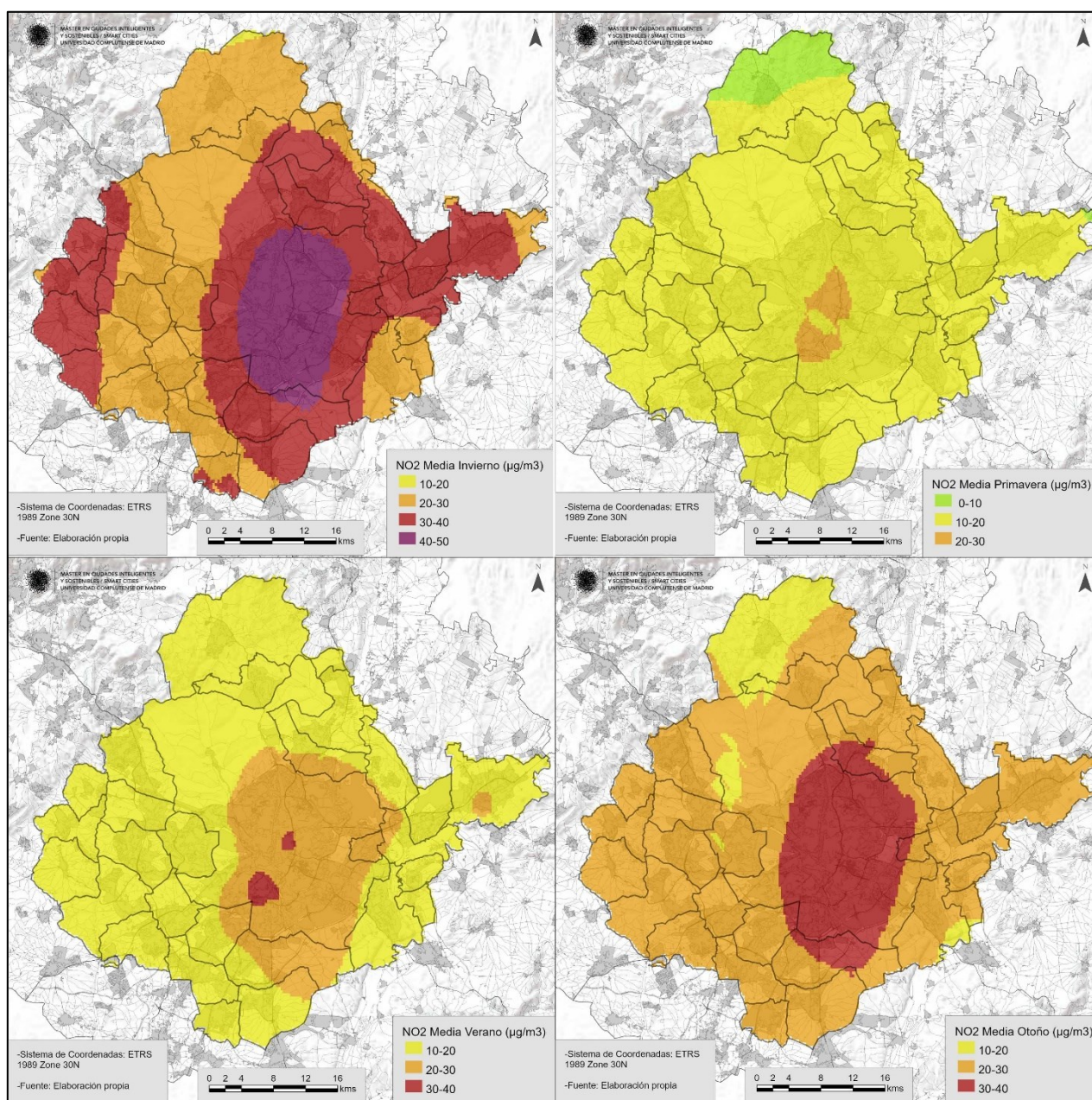


Figura 43. Contaminación por NO₂ en el Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

Se observa la distribución espacial del NO₂ (Dióxido de Nitrógeno) en el área de estudio para el periodo 2019-2020. La zona con mayores niveles de contaminación, se localizándose sobre en el centro-sureste del ámbito de estudio. Se observa, un incremento de más de 10 µg/m³ en las zonas con menor calidad del aire entre el invierno y el resto de las estaciones. Este aumento se da sobre todo en la zona de más contaminación (M-30-40, Moratalaz, Vallecas, Villaverde, Carabanchel, Usera), aunque se distribuye por todo el ámbito de estudio, viéndose incrementos notables en la periferia norte, en menor medida, sur y sobre todo oeste y este, en las áreas del corredor del Henares. El aumento es consistente entre estaciones pasando de una primavera con datos reducidos entre los 0-30 µg/m³ (con muy pocas zonas con datos altos) a un verano donde la zona de entre 20-30 µg/m³ comienza a expandirse, encontrándose picos de 30-40 µg/m³. Ya en otoño, se puede ver como prácticamente toda la periferia, excepto el norte aumenta sus niveles hasta los 20-40 µg/m³ y en invierno se alcanza valores máximos llegando a alcanzar los 50 µg/m³ en la zona más contaminada.

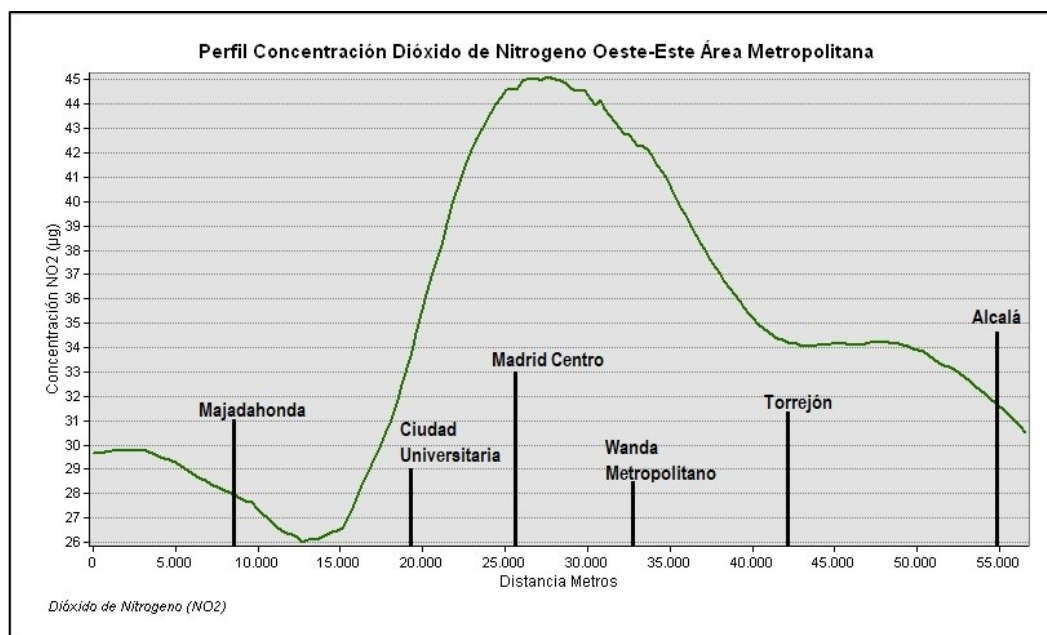


Figura 44. Perfil Invierno Oeste-Este Contaminación por NO₂ Oeste-Este en el Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

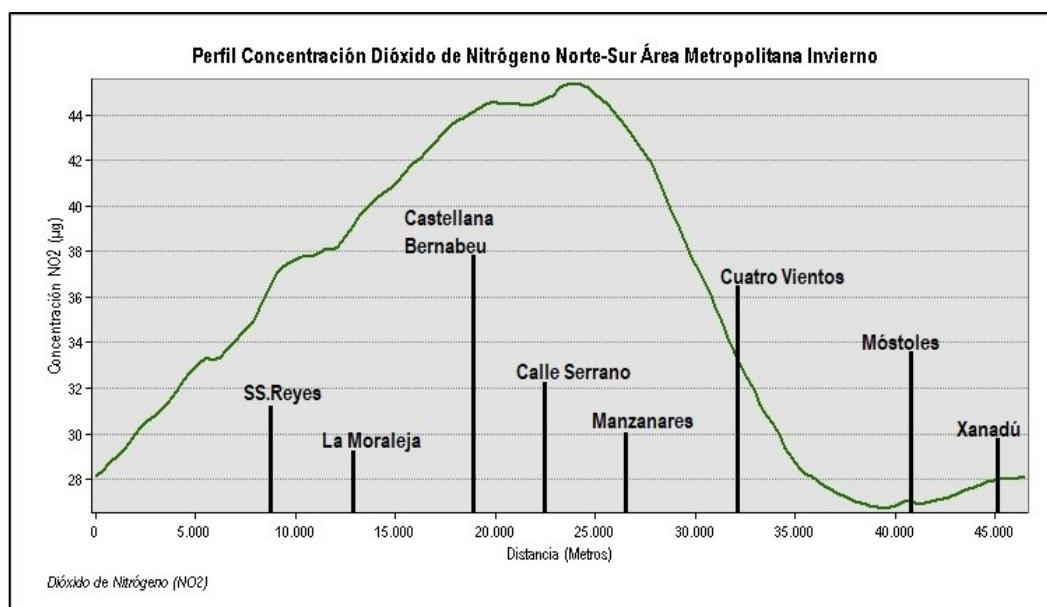


Figura 45. Perfil Invierno Oeste-Este Contaminación por NO₂ Norte-Sur en el Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

En los perfiles (fig. 44-45) se observa una distribución donde la ciudad central se encuentra más afectada por este contaminante que la periferia, si bien el noreste del área de estudio denota un incremento mayor que otros lugares del ámbito de estudio. Este incremento es, en invierno, de hasta 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entre Móstoles y la Calle Serrano (fig.45) o entre Majadahonda y el distrito Centro. La diferencia es menor entre zonas como el Torrejón o San Sebastián de los Reyes, donde la diferencia es de aproximadamente 10-12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ lo que confirma la tendencia mencionada al principio de este párrafo. Se observa como en el corredor del Henares las concentraciones descienden con respecto al centro de la ciudad, pero quedan en un valor moderado y mantenido sin llegar a descender tanto como en el Oeste del área de estudio.

4.4 Contaminación por PM_{2.5} (Material Particulado) en el Área Metropolitana de Madrid.

El establecimiento de un comportamiento espacial del PM_{2.5} ha sido posible gracias a la realización de un análisis estacional (fig. 46) y mensual (Ver Anexo fig.73-74 - Pag 74-75) que ha permitido cartografiar los patrones de distribución de este contaminante en el área de estudio.

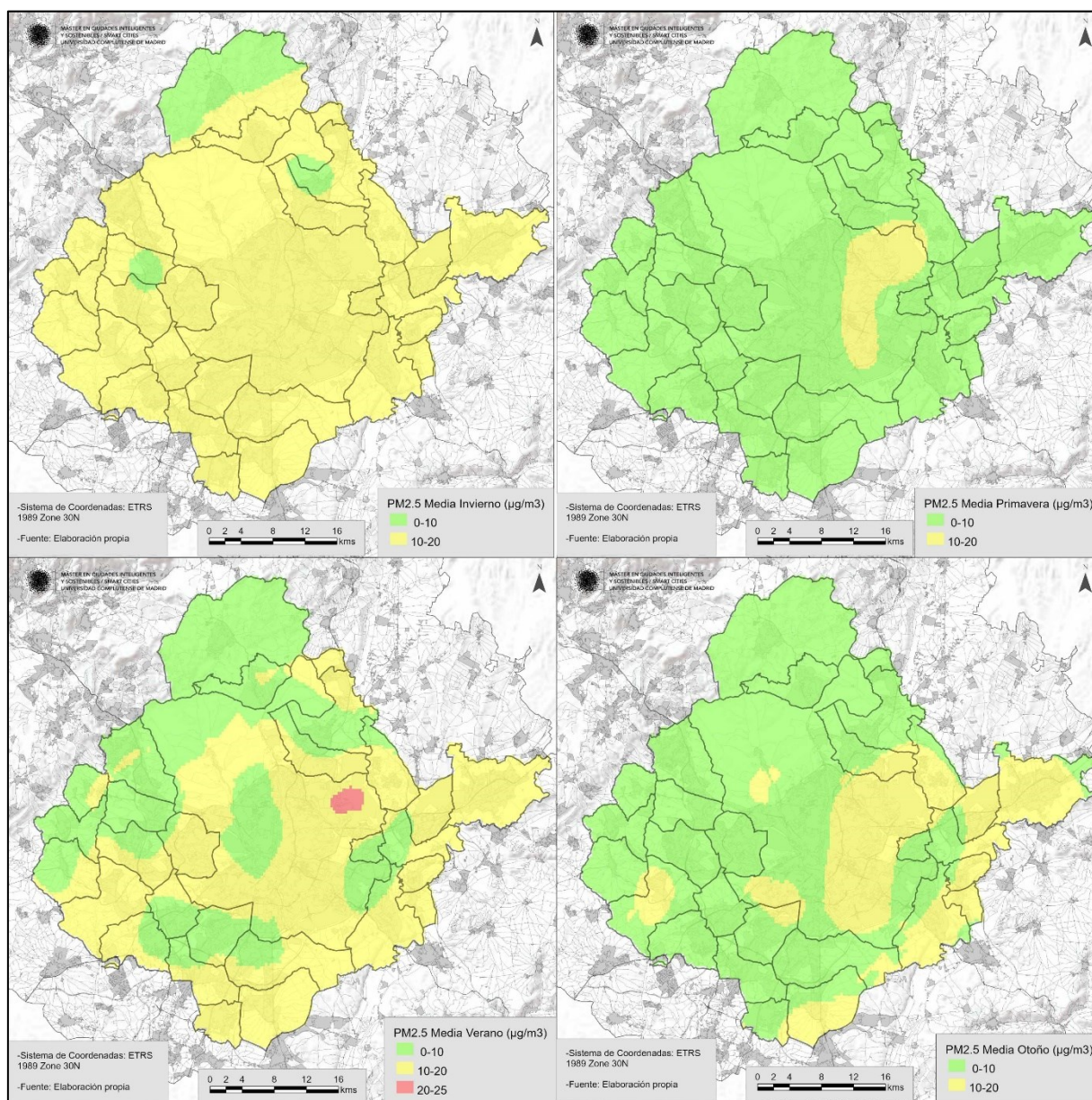


Figura 46. Contaminación por PM_{2.5} en el Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

Es posible observar la distribución espacial (fig.46) en el área de estudio, de tal forma que se establece una tendencia de incremento de la contaminación por PM_{2.5} hacia el este, situándose el pico en la zona centro-

noreste de la ciudad, entorno a la M-40 y el Aeropuerto Madrid-Barajas-Adolfo Suárez. En este sentido, se observa como los niveles siguen una estacionalidad, encontrando en primavera un ámbito con la mayoría de la zona entre 0 y 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y una pequeña mancha con valores entre 10-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ que se adscribe a la zona este de la ciudad de Madrid. En verano esta zona de entre 10-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aumenta de manera ostensible, expandiéndose por toda la periferia sur y este, encontrando un pico de 20-25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ en la zona del Aeropuerto de Barajas. Sólo la periferia norte y reducidas zonas del sur, este y centro se encuentran con valores suaves de entre 0-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Ya en otoño, la tendencia es similar a la de primavera, aunque la zona de entre 10-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ aumenta un poco se expande hacia el este y el sureste. Por último en invierno, prácticamente toda la periferia se encuentra con valores de entre 10-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que supone una expansión respecto al otoño, y quedando exclusivamente la periferia norte con valores de entre 0-10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,

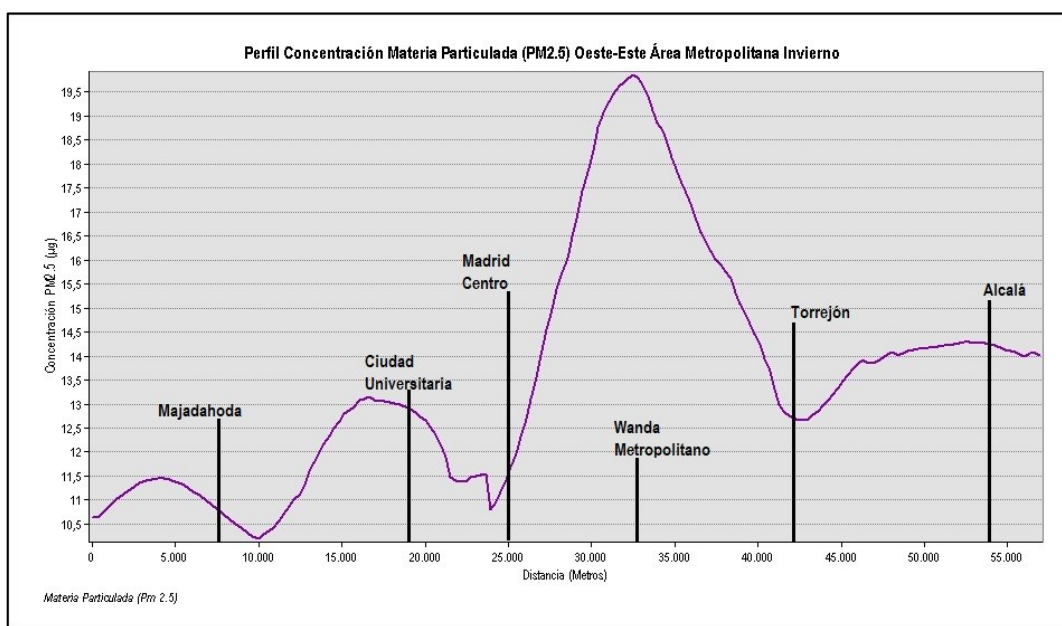


Figura 47. Perfil Invierno Este-Oeste Contaminación por PM_{2.5} en el Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

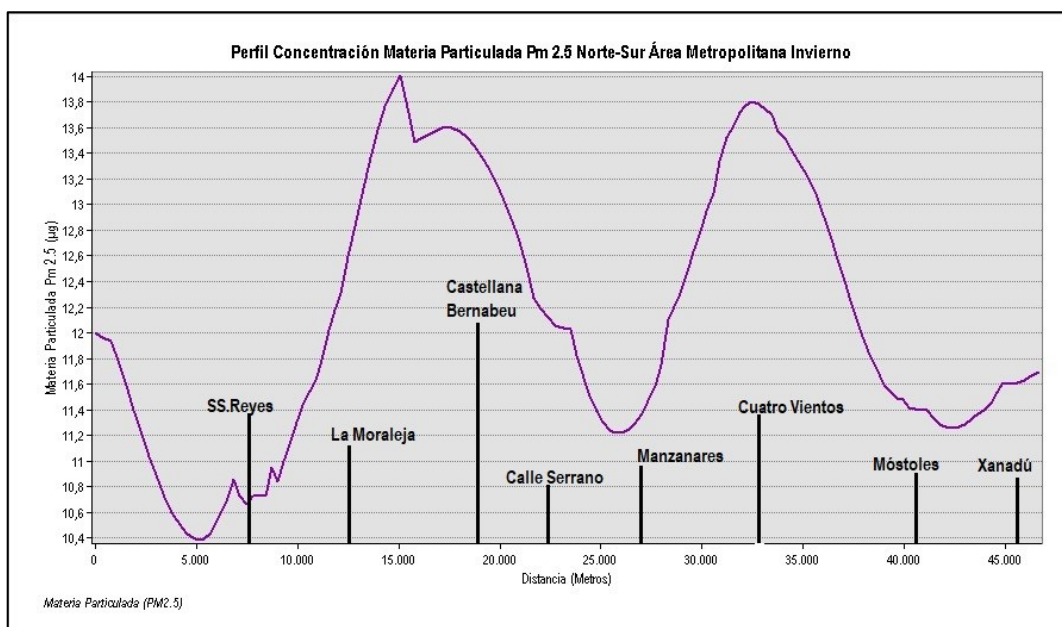


Figura 48. Perfil Invierno Norte-Sur Contaminación por PM_{2.5} en el Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

En los gráficos (fig.47-48), se observa una distribución central en la ciudad, pero que tiende a expandirse más hacia la periferia que el NO₂, teniendo incrementos evidentes en zonas cercanas a los Aeropuertos de Barajas

o al Aeródromo de Cuatro Vientos. La distribución tiende a una concentración más difusa por el ámbito de estudio. Encontrando picos en el sur y el este de la ciudad de Madrid. Se pueden observar diferencia de hasta $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre zonas como Majadahonda y el Wanda Metropolitano (fig.47) o de $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ entre San Sebastián de los Reyes y la Castellana o Cuatro Vientos. Cabe destacar que en la zona del río Manzanares se produce una vaguada de $3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ respecto a la zona norte y la posterior de Cuatro Vientos.

4.5 La COVID-19 en el Área Metropolitana de Madrid.

La distribución espacial del virus **SARS-CoV-2**, ha sido uno de los factores más relevantes en el análisis realizado ya que se trata de uno de los pilares fundamentales del estudio.

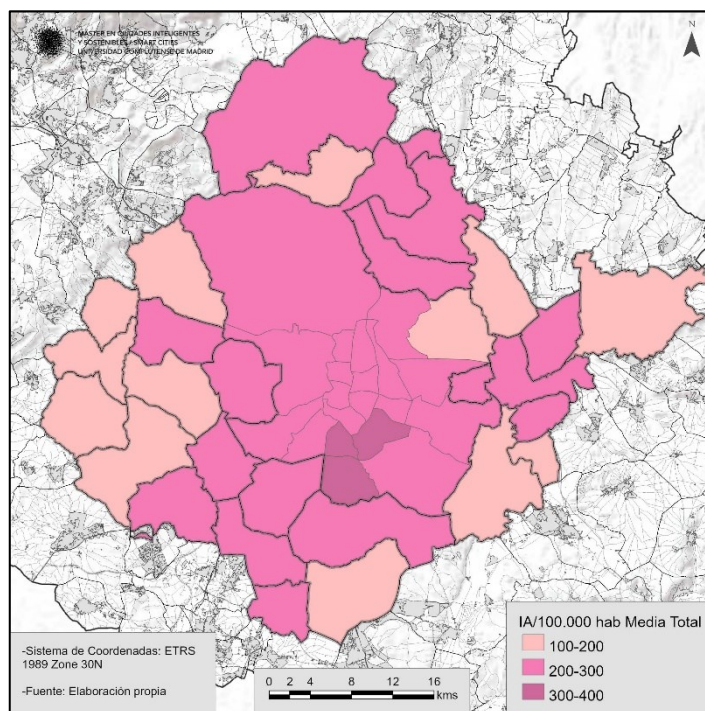


Figura 49. IA/100.000 hab media (2020) en el Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

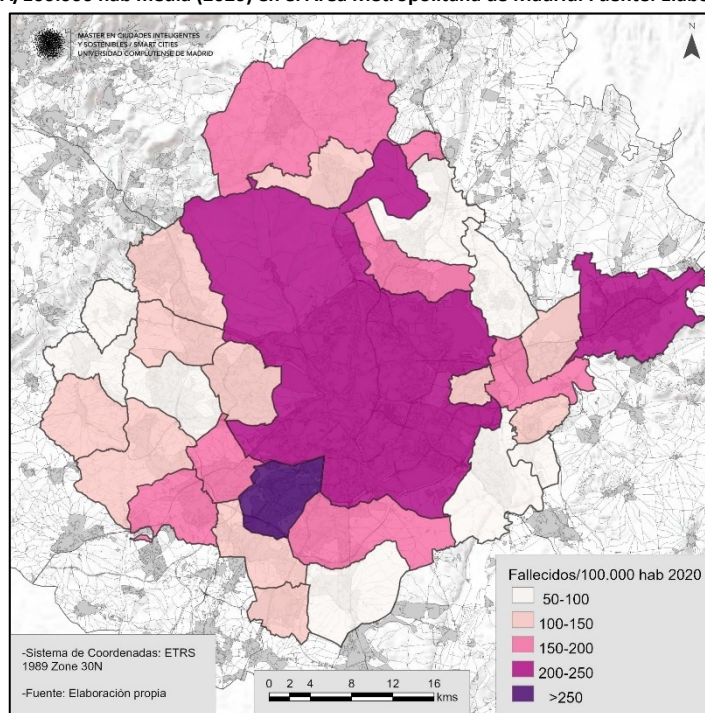


Figura 50. Fallecidos/100.000 hab (2020) en el Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

Se observa una distribución central y al sur de ambas variables, teniendo como zonas más afectadas por la incidencia acumulada el sur municipio de Madrid, viéndose además más afectadas las periferias sur y norte. Respecto a los fallecidos, la tendencia es similar, teniendo como punto con valor máximo el municipio de Leganés y los de Madrid y Alcalá de Henares siguiendo una distribución similar a la de la incidencia.

4.6 Correlación entre temperatura y contaminación por NO₂

Para el establecimiento de esta correlación se han trazado perfiles estacionales (Ver Anexo fig.77- Pag 80) tomando como referencia los mismos puntos de medición para ambas variables. Se observa una evidente correlación entre el aumento de temperatura y el contaminante (fig. 51-52).

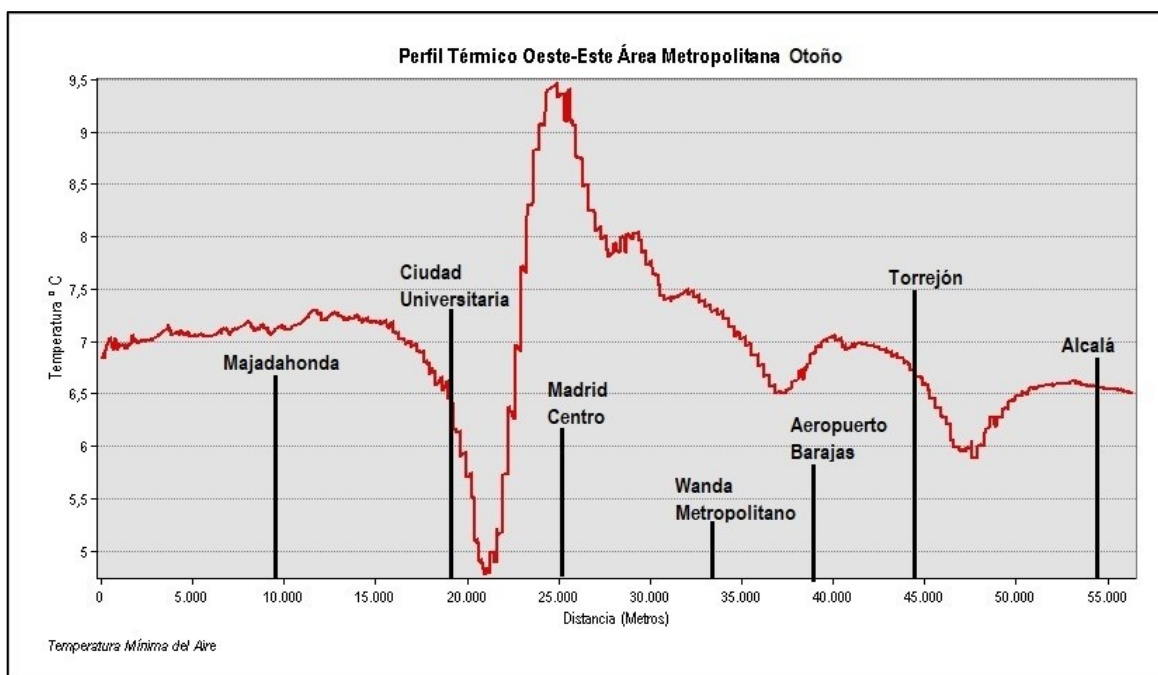


Figura 51. Perfil Térmico Otoño Oeste-Este en el Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

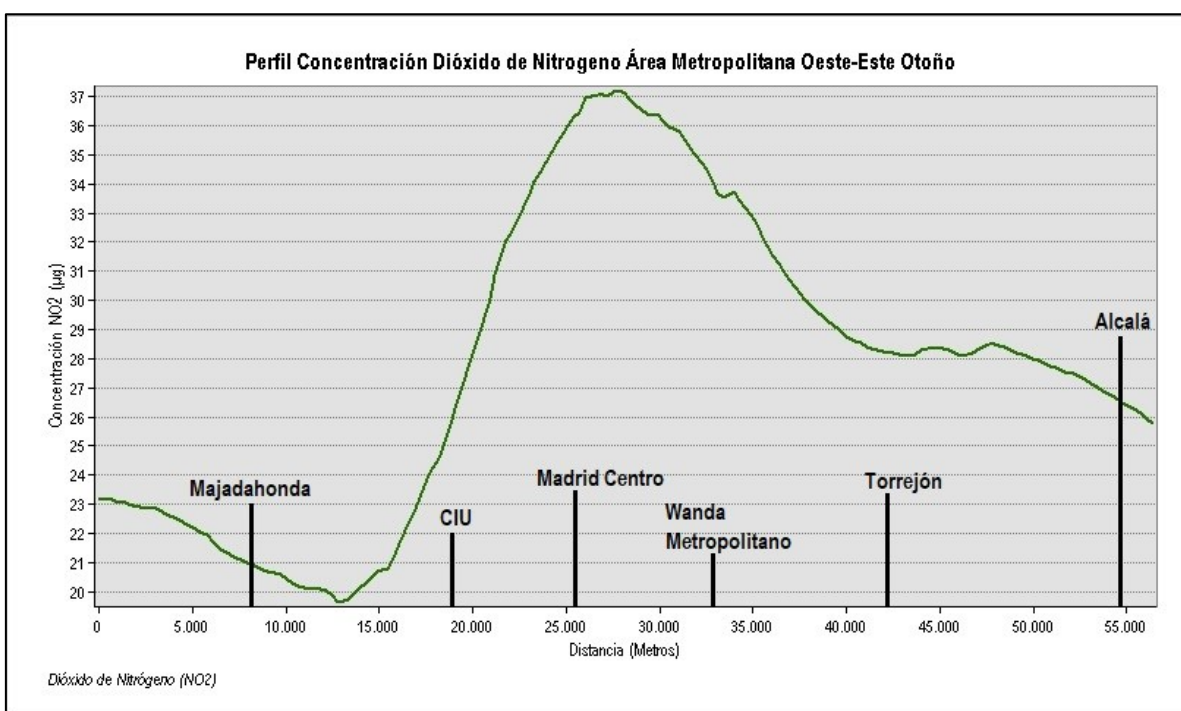


Figura 52. Perfil Contaminación Otoño NO₂ Oeste-Este en el Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

Existe una evidente correlación visual entre ambos perfiles, dándose incrementos de ambas variables en los mismos puntos (Madrid Centro, Alcalá de Henares, Majadahonda) y siguiendo tendencias similares. Se puede ver como cuando la temperatura alcanza su máximo valor en la zona centro (6,5 °C), el NO₂ obtiene, también sus mayores niveles (45 µg/m³).

4.7 Correlación entre temperatura y contaminación por PM_{2.5}.

Para el establecimiento de esta correlación se han trazado perfiles (Ver Anexo fig.78- Pag 81) tomando como referencia los mismos puntos de medición para ambas variables. Se observa una correlación visual más reducida, con un evidente desplazamiento hacia el este del contaminante respecto a los puntos de alta temperatura (fig.53-54).

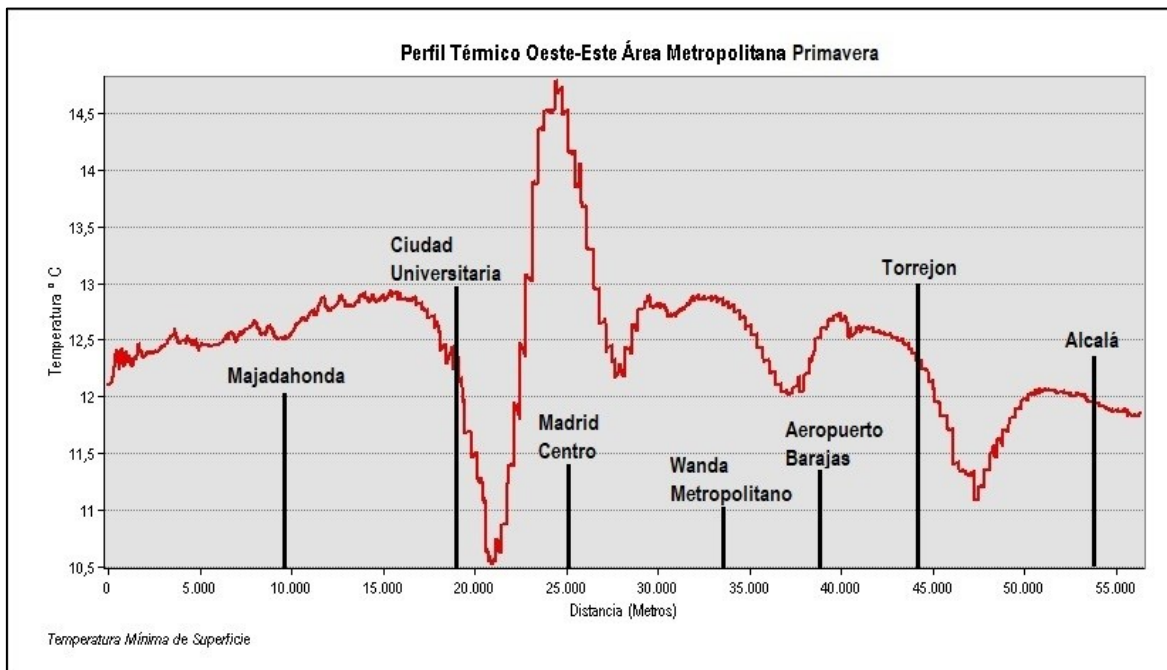


Figura 53. Perfil Térmico Primavera Oeste-Este en el Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

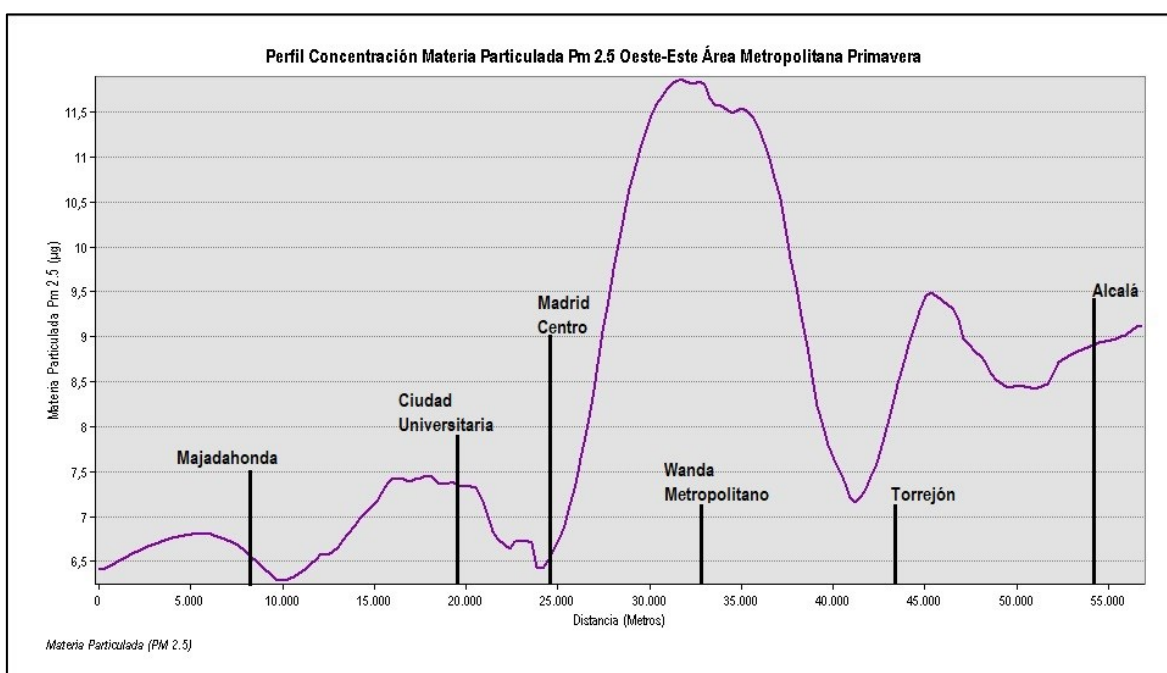


Figura 54. Perfil Contaminación NO₂ Primavera Oeste-Este en el Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

4.8 Correlación entre temperatura y COVID-19.

En pro de establecer una correlación entre la temperatura media y la COVID-19 se ha llevado a cabo el siguiente gráfico de tal forma que sea posible observar el comportamiento de la enfermedad las distintas condiciones térmicas.

Es posible observar cómo la incidencia acumulada parece correlacionar bien en el primer y tercer tercio de la gráfica. A partir del mes de septiembre, ambas variables descienden con la misma tendencia, por tanto, podría existir cierta correlación. Sin embargo, durante el segundo tercio de la gráfica, las variables parecen presentar una correlación invertida o negativa, observándose un descenso de la incidencia acumulada a partir de abril, mientras la temperatura asciende y un descenso de la temperatura mientras asciende la incidencia acumulada

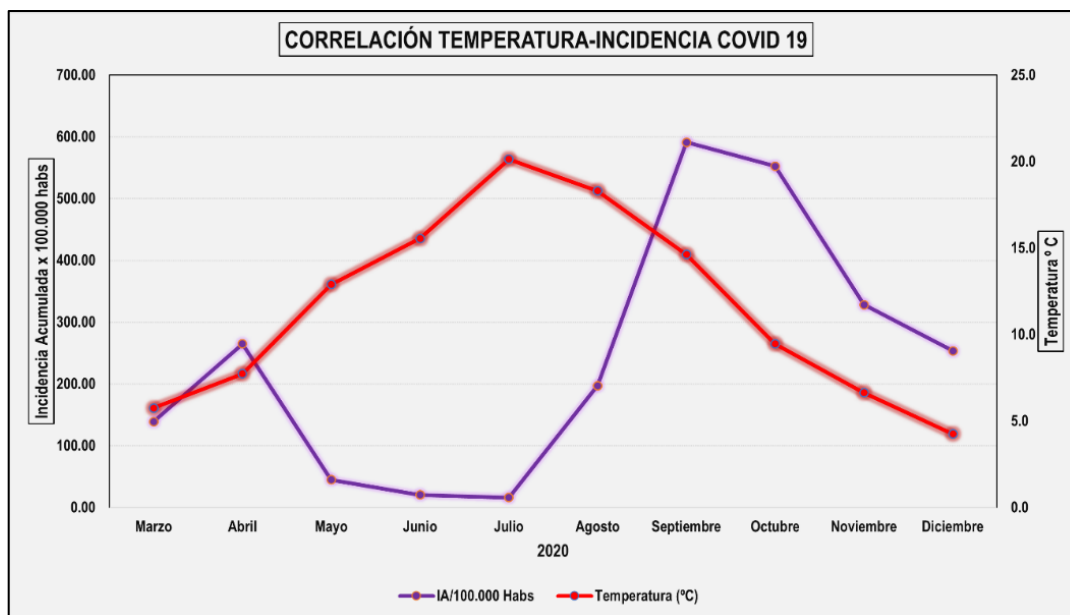


Figura 55. Correlación Temperatura Media-COVID-19. Fuente: Elaboración propia

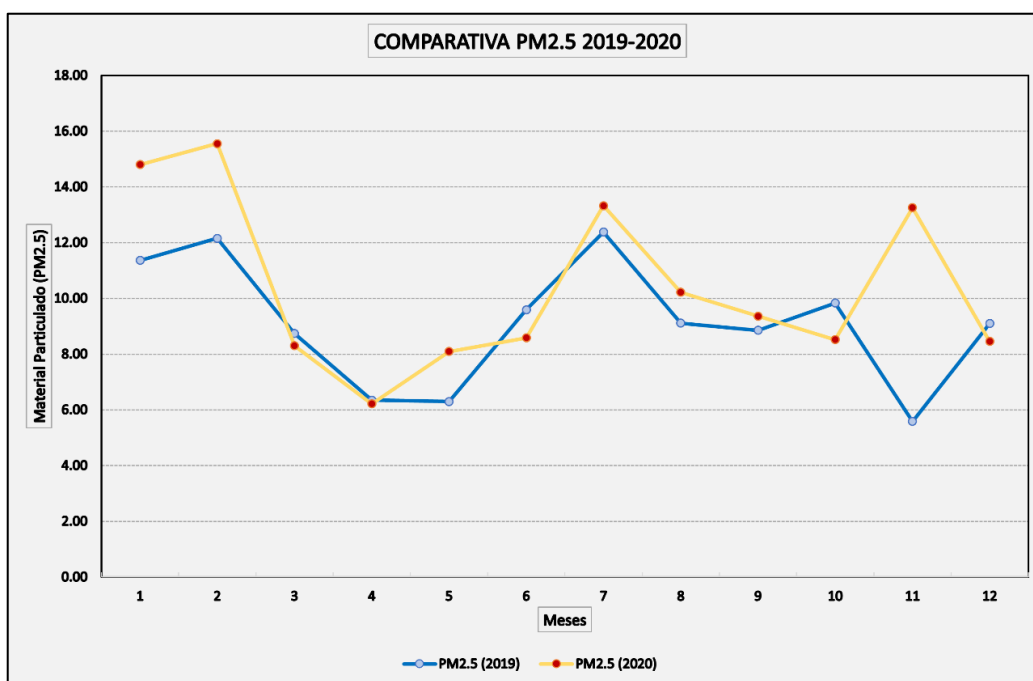


Figura 56. NO₂ 2019-2020. Fuente: Elaboración propia

4.9 Correlación entre la calidad del aire y la COVID-19.

Para este análisis se han utilizado gráficos lineales de comparación entre las variables en los dos años que conforman el periodo de estudio. Se observa un claro descenso del NO₂ en el año 2020 (fig.56).

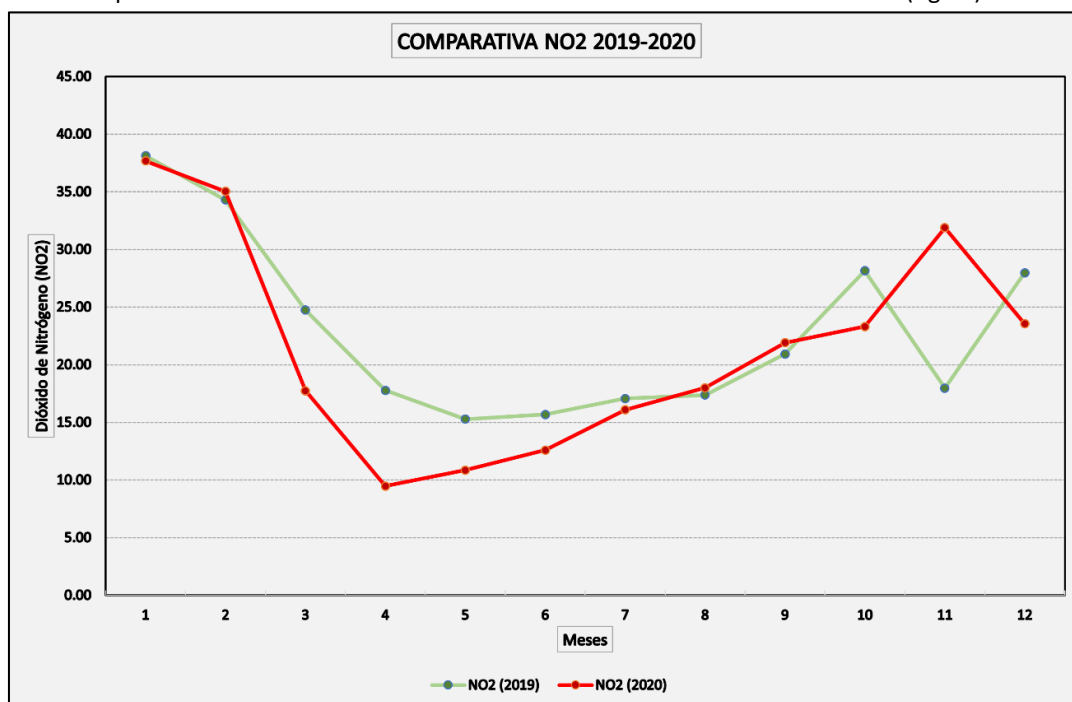


Figura 57. PM_{2.5} 2019-2020. Fuente: Elaboración propia

4.10 Correlación entre la contaminación por NO₂ y PM_{2.5} y la COVID-19.

Para la correlación se ha decidido llevar a cabo gráficos de dispersión con los valores de ambas variables. Se observa una correlación positiva de la exposición a NO₂ y la incidencia acumulada, así como con los fallecimientos (fig. 58-59).

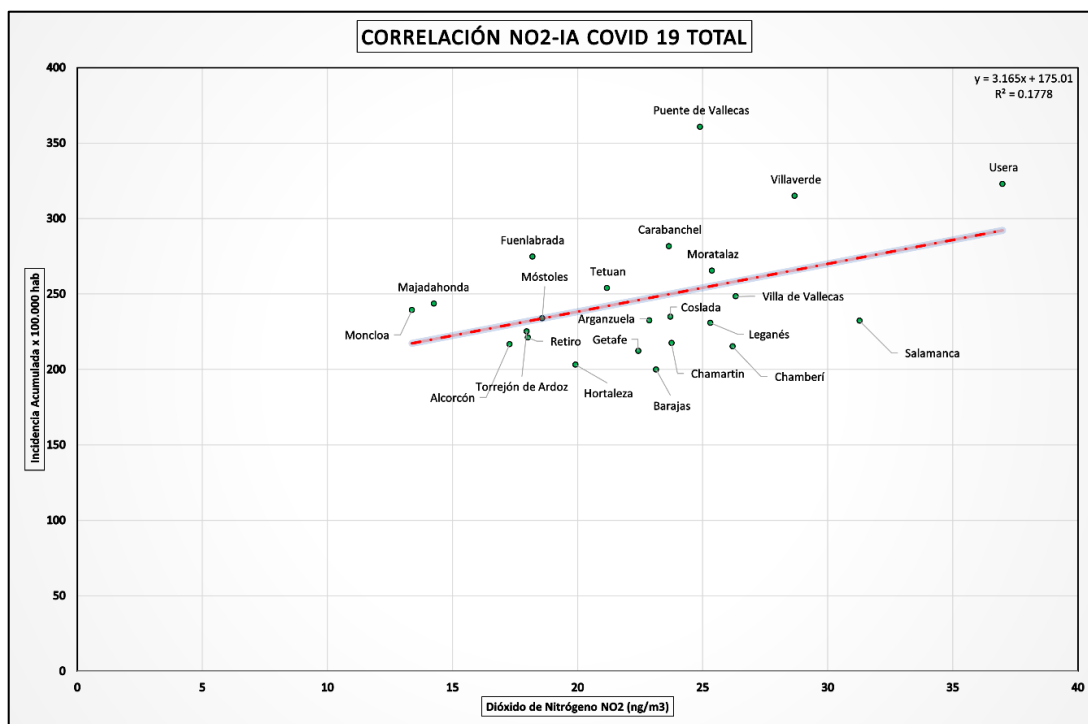


Figura 58. Correlación NO2-IA COVID-19. Fuente: Elaboración propia

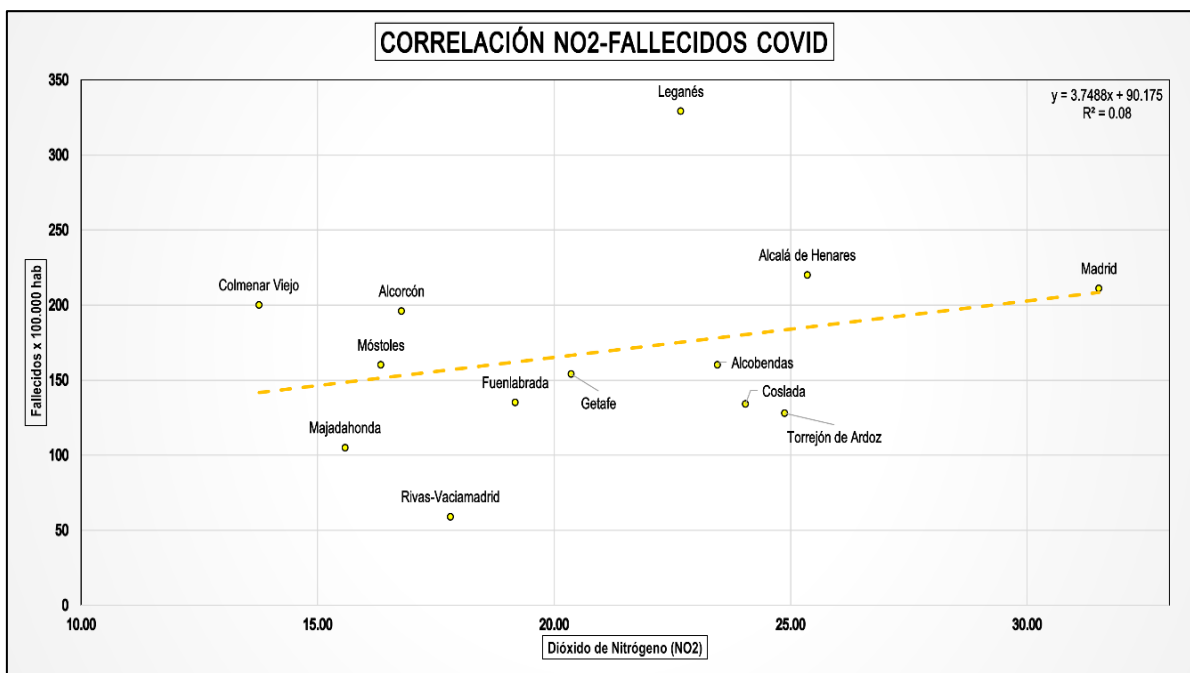


Figura 59. Correlación NO2-Mortalidad COVID-19. Fuente: Elaboración propia

Para la correlación se ha decidido llevar a cabo un gráfico de dispersión con los valores de ambas variables. Se observa una correlación negativa, poco significativa, entre la incidencia acumulada y el PM_{2.5} lo que podría indicar una falta de correlación debido a posiblemente a la consolidación de los datos o al volumen de la muestra (fig.60). Sin embargo, existe, aunque débil, una correlación positiva con los fallecimientos., encontrando una tendencia que podría dar lugar al establecimiento de una posible relación entre ambas variables.

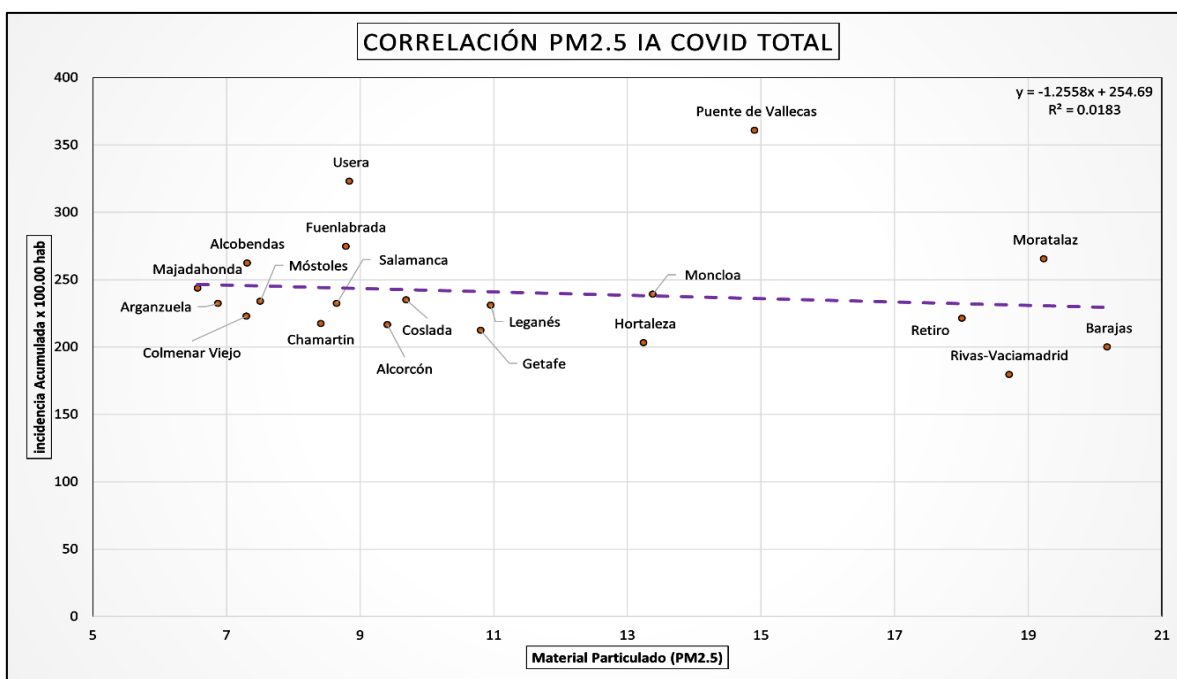


Figura 60. Correlación PM_{2.5}-IA COVID-19. Fuente: Elaboración propia

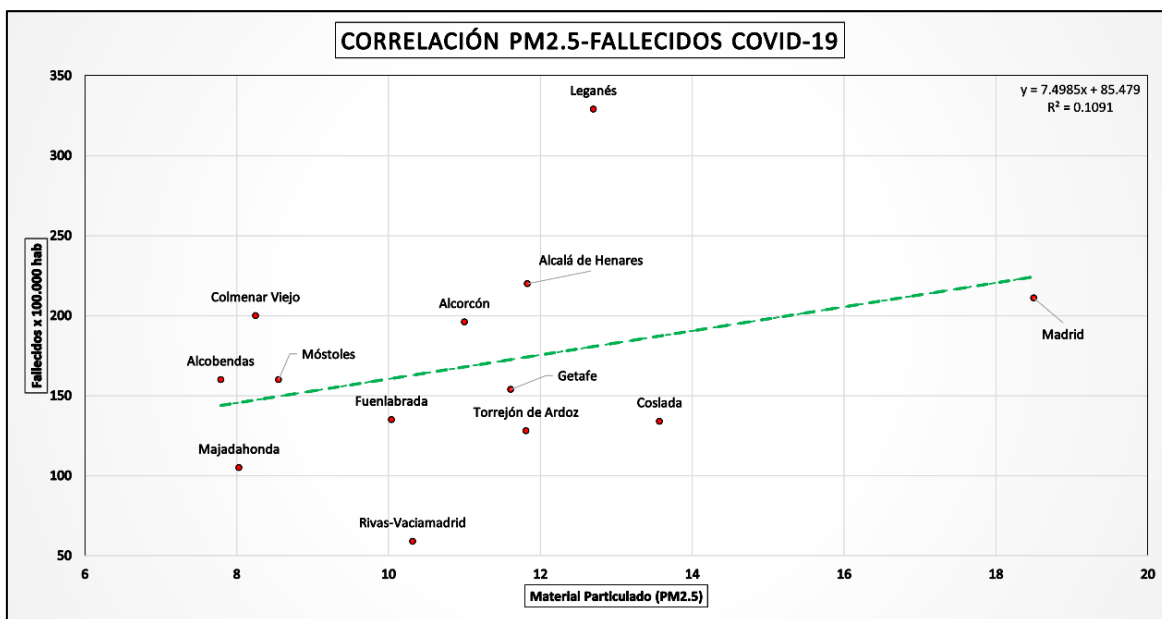


Figura 61. Correlación PM_{2.5}-Mortalidad COVID-19. Fuente: Elaboración propia

5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez obtenidos los resultados, se procede a llevar a cabo una discusión y análisis de estos respecto a las tendencias y relaciones observados en ellos.

5.1 Isla de Calor Urbana (ICU) en el Área Metropolitana de Madrid.

En referencia a este fenómeno es posible observar como la distribución espacial de la Isla de Calor (ICU) en Madrid obedece a una distribución de centro periferia mayoritariamente. En este sentido la zona centro del área metropolitana correspondiente al municipio de Madrid, es la que se ve más afectada por la ICU, encontrándose incluso diferencias de hasta 10 °C en algunos puntos (Distrito Centro-Moncloa).

Este fenómeno, se ve incrementando concretamente en los distritos de **Moratalaz, Vallecas, Carabanchel, Latina, Centro y Chamberí** cuya diferencia de temperatura respecto a otros puntos del ámbito de estudio es de entre 8 y 11 °C en algunos casos (fig.37). En sentido contrario, los menos afectados por el fenómeno son **Moncloa o Chamartín** cuyas temperaturas son durante todo el año notablemente más bajas que en el resto de la ciudad, un causante probable de lo anterior es el menor grado de desarrollo urbano, con calles más amplias y más cubierta vegetal.

Estacionalmente hablando (Ver Anexo fig.64-65- Pag 62-63), observamos un incremento evidente de las temperaturas en verano, donde se expande de mayor manera. Sin embargo, es generalmente en invierno, con 7,5 °C cuando mayores diferencias de temperatura se dan, debido a que el enfriamiento exterior es más destacado que el del centro urbano.

En referencia a lo anterior, cabe resaltar ciertos datos de importancia y que reflejan de una mejor manera cual es el comportamiento espacial de la ICU. Encontramos como el efecto de la vaguada del río Manzanares genera una zona de bajas temperaturas que se corresponde con la Ciudad Universitaria (distrito Moncloa), esto viene dado por el propio relieve generado y por la capacidad reguladora de la temperatura de los cursos fluviales. Hay que destacar el efecto termorregulador producido por el Parque del Retiro que tiene un efecto significativo en la reducción de la ICU en la capital. En este caso los resultados del estudio muestran de manera evidente (Ver Anexo tabla 2- Pag 60), como se produce una reducción de la temperatura. El Pardo es otro de los ejemplos en los que se pueden ver temperaturas más reducidas que un su entorno.

En cuanto al resto del área de estudio es posible observar, teniendo en cuenta la limitación de los datos, como existe una diferencia evidente entre norte y sur, poseyendo este último entre 5-10 ° C de temperatura mayor respecto al primero. Sin embargo, se observan una homogeneidad térmica en la periferia, encontrando menores diferencias en los municipios anexos a Madrid que en el propio municipio de Madrid.

En general, podemos ver una afección de la Isla de Calor (ICU) que sigue un patrón que podríamos denominar “social”. Los barrios con mayor vulnerabilidad se ven afectados de una forma notablemente mayor que barrios de elevada clase social. Esto obviamente, va más allá de la estructura socioeconómica de la ciudad, teniendo una explicación urbana y ambiental que traza el esquema de comportamiento de este fenómeno. Teniendo en cuenta que las existen factores como las propiedades físicas de los materiales, la morfología urbana que afecta al sombreado y al movimiento del aire, la compacidad de los barrios que se deriva en su mayoría de la densidad de población o la falta de zonas verde que condicionan claramente el comportamiento de la Isla de Calor Urbana (ICU), es posible encontrar una explicación a este patrón de distribución espacial de la misma en Madrid, ya que son variables que condiciona el comportamiento térmico del espacio público.

Estas morfologías sí pueden influir en la diferente virulencia del fenómeno entre barrios de mayor clase socioeconómica y de menor. Ya que algunas zonas de renta elevada poseen calles amplias y más espacios ajardinados. Es el caso de Chamberí, aparte de estar cerca del borde de Madrid y Río Manzanares, posee numerosos edificios con materiales antiguos y de colores blanquecinos, que pueden llevar a mayor enfriamiento.

Las zonas más afectadas por la Isla de Calor Urbana (ICU) se corresponden con aquellas donde la infraestructura urbana y su morfología se encuentra más degradada, con calles más estrechas donde el almacenamiento térmico es mayor y existe una ventilación menor del espacio de calle. Además se observa una menor cantidad de espacios verdes y arbolado urbano cuya relevancia para reducir los efectos de la ICU es extraordinariamente elevada. Además cabe destacar la densidad del transporte, donde se encuentran grandes vías de comunicación como la M-30 y sus distintos nudos que incrementan el volumen de tráfico rodado y por tanto aumentan el efecto. En general, se puede decir que la isla de calor es proporcional a la mancha urbana de Madrid, con una tendencia evidentemente centro-sureste.

Que la Isla de Calor (ICU) afecte de mayor manera a zonas de mayor vulnerabilidad socioeconómica supone un gran riesgo ya que son barrios cuya antigüedad y calidad de la edificación o la falta de climatización de esta generan problemas para hacer frente a las altas temperaturas, amplificando los efectos adversos de este fenómeno. Durante las olas de calor, agravadas por la ICU, se reagudizan las patologías de base, y aumentan los problemas de salud como los mareos, accidentes cerebrovasculares y los problemas de hipertensión arterial.

5.2 Temperatura de Superficie en el Área Metropolitana de Madrid.

El análisis de los resultados obtenidos el tratamiento de las imágenes de satélite permite observar un fenómeno complementario al observado en temperatura del aire. Los datos obtenidos, pertenecientes a las primeras horas del día nos muestran la llamada Isla de Frescor. En este caso encontramos diferencias notables durante todo el periodo estudiado por encima de los 10 ° C en algunas ocasiones entre el centro y la periferia. Dichas diferencias térmicas suelen revertirse durante la noche, en la que el gran espacio construido libera el calor diurno acumulado, de forma similar a los acumuladores térmicos, acrecentando con ello la isla de calor nocturna. (Ver Anexo tabla 2- Pag 60)

En la cartografía resultante (fig.42) encontramos como la zona urbana residencial de los municipios y sus espacios verdes tienen una temperatura notablemente menor que la encontrada en áreas industriales y no urbanizadas donde se produce un incremento térmico evidente.

En los perfiles térmicos realizados (Ver Anexo fig.65- Pag 64) observamos como, por ejemplo, en el municipio de Madrid, Casa de Campo posee una temperatura mayor que la zona centro y según se aleja de este, la temperatura vuelve a aumentar superada la M-40 en la zona de Vicálvaro.

Esto se debe, a que durante el día, la mayor capacidad calorífica de los materiales urbanos, así como las múltiples sombras provocadas por los edificios mantienen la ciudad más fría que los alrededores. El efecto sombra de los edificios provoca un aumento de la sensación de bienestar ya que la temperatura más baja se suma la disminución de la radiación solar. En cambio, en zonas con calles más anchas y también más ventiladas, que poseen materiales de construcción que absorben peor el calor, la temperatura es notablemente más elevada.

Es decir, se produce un efecto contrario al de la Isla de Calor Urbana (ICU), durante el día los materiales que poseen mayor temperatura de superficie reflejan de mayor manera la radiación solar. En cambio, los materiales con menor temperatura de superficie absorben mejor el calor provocando que durante la noche, cuando el calor almacenado por el asfalto o los edificios se reemite a la atmósfera en forma de radiación de onda larga se incrementen la temperatura del aire dentro de la ciudad varios grados por encima de la temperatura registrada en las áreas no urbanas. (Cañada Torrecilla, 2012)

Lo que se observa, por tanto son resultados complementarios que muestran el reflejo de ambos fenómenos y como estos, se retroalimentan, siendo las zonas más frías durante el día, las que mayor temperatura poseen durante la noche y a la inversa.

5.3 Contaminación por NO₂ (Dióxido de Nitrógeno) en el Área Metropolitana de Madrid.

En referencia a la contaminación por Dióxido de Nitrógeno (NO₂), el análisis de los resultados muestra un obvio componente estacional del mismo donde los meses de invierno se observa un incremento en el este de la ciudad muy evidente (fig.43). Esto se debe al ya mencionado, fenómeno de inversión térmica, donde el aire frío pesa más que el caliente por lo que, en condiciones normales, este último asciende de manera natural y se mezcla en las capas más altas de la atmósfera. Normalmente, el aire más cercano al suelo está más caliente que el que tiene por encima a mayor altitud, menor temperatura.

En estas circunstancias, cuando la temperatura baja, el suelo se enfría rápidamente y provoca también una bajada drástica de temperatura en el aire de las capas más bajas (el que se respira y el que presenta una mayor concentración de contaminantes).

Es decir, este incremento invernal se produce debido a la importancia de la variable climática acaecidas, que generalmente en Madrid son anticiclónicas, con cielos despejados y vientos débiles. Es por ello por lo que reduce durante las otras estaciones ya que, el fenómeno de inversión térmica no se produce durante los meses cálidos o bien debido a que existe una climatología favorable con vientos y precipitaciones.

Teniendo en cuenta que el límite establecido para la salud, por la Comunidad de Madrid que es de 40 µg/m³ debemos analizar tanto el comportamiento espacial como los datos de las distintas estaciones. En el invierno del año 2020 este valor fue superado por más 26 estaciones de control y por más de 24 en 2019. Las zonas más afectas fueron Plaza Elíptica, Escuelas Aguirre, Villaverde Alto, Barajas, Vallecas o Moratalaz en la periferia las zonas más afectadas son las correspondientes al Corredor del Henares (Alcalá y Torrejón de Ardoz) y las grandes ciudades del cinturón sur como Alcorcón, Leganés o Getafe (Ver Anexo tabla 4- Pag 67).

La explicación a esta distribución espacial viene dada por la procedencia de este contaminante, que en el caso de Madrid, es mayoritariamente, de los escapes de los vehículos a motor. Hay que tener en cuenta que las zonas mencionadas, por ejemplo Plaza Elíptica, poseen grandes volúmenes de tráfico y enlaces a las grandes vías de comunicación como la M-30 o 40. En el caso de la periferia, es de destacar que los mayores niveles se dan en ciudades cuya actuación como ciudad dormitorio, provoca un mayor desplazamiento de población a zonas de trabajo lo que incrementa el volumen del tráfico. Además, en el caso del Corredor del Henares, su característica como núcleo logístico, provoca que circulen un mayor número de vehículos pesados lo que incrementa la emisión de este contaminante.

5.4 Contaminación por PM_{2.5} (Material Particulado) en el Área Metropolitana de Madrid.

En el caso de la contaminación por PM_{2.5} posee también un evidente patrón estacional, dándose las mayores concentraciones de este en verano y en invierno en menor medida. Para la primera de las estaciones en el ámbito de estudio, una causa muy frecuente de aumento de partículas es la llegada de polvo del desierto del Sáhara empujado por vientos del sur. En invierno, la mayor circulación de vehículos diésel y una estabilidad atmosférica mayor, provoca también incrementos en la concentración.

En este caso, el límite establecido para la salud por la Comunidad de Madrid es de 25 µg/m³, el cual durante 2019 fue superado en los meses de febrero y julio por las estaciones de Barajas y Alcalá de Henares. En 2020 sólo Vallecas y Barajas superaron el umbral en los mismos meses (Ver Anexo tabla 6 - Pag 72).

Aún por debajo del límite las zonas más afectadas son Alcobendas, Alcorcón, Algete, Aranjuez. La distribución espacial del contaminante respecto al Dióxido de Nitrógeno se desplaza al este y al sur de la M-30. Esto puede ser debido a que los resultados muestran que los aeropuertos y aeródromos tienen cierto impacto sobre la calidad del aire. Investigaciones recientes (FFII, 2017) muestran que el transporte aéreo en Madrid podría generar por sí mismo un 5% de las emisiones de PM_{2.5}. Sin embargo, esta cifra podría ser más elevada dada la movilización por el viento de los reactores por turbina de las aeronaves, los cuales levantarían materia particulada que no estarían generando por sí mismos. Otros estudios a nivel europeo (Zurich Airport, 2017; Zurich Airport, 2018) caracterizan el PM_{2.5} en las zonas adyacentes al aeropuerto de Zurich, así como se caracteriza, también, la influencia del PM_{2.5} de la aviación en la salud humana (Barret et al; 2010, Yim et al; 2015) determinándose la fuerte influencia y emisividad asociados al transporte aéreo. Debido a su ubicación, resulta difícil distinguir si los contaminantes surgen de las operaciones de estos o provienen de otras posibles fuentes de contaminantes del área como el tráfico rodado asociado al aeropuerto, pero su distribución marca niveles altos en la cercanía de estas infraestructuras.

5.5 La COVID-19 en el Área Metropolitana de Madrid.

El análisis de los resultados obtenidos respecto a la incidencia acumulada y fallecimientos en el área metropolitana de Madrid ha permitido corroborar de manera clara, que un virus que posee características tan específicas afecta en mayor grado a las grandes áreas urbanas. El ámbito de estudio concentra la mayor parte de los contagios dados en la Comunidad de Madrid, algo que por otra parte, es completamente lógico, debido a que la movilidad y el intercambio de población (que afectaban a las variables anteriormente analizadas) genera un caldo de cultivo, que unido a la densidad de población y otros indicadores, hacen de Madrid una de las zonas más afectadas por la pandemia a nivel nacional.

Es destacable que la incidencia acumulada no ha tenido influencia en el área de estudio de la misma forma ni en los mismos tiempos, encontrándose zonas donde tanto las restricciones como la afección han sido mayores en una amplia parte del periodo estudiado. (Ver Anexo fig.77 - Pag 81)

Desde el inicio de la pandemia, la tasa de incidencia acumulada se ha concentrado especialmente alrededor de cinco focos: Leganés, Barrio del Pilar-Tetuán, el eje de la A-3 (Moratalaz-Vallecas), El Pardo y, en menor medida, Alcalá de Henares. Sin embargo, con el paso del tiempo las altas tasas de incidencia acumulada se han ido expandiendo alrededor de ellos, así como, generando nuevos clústeres de alta incidencia en Coslada, el eje de la A-5, el distrito centro y Chamberí (Ver Anexo tabla 8 - Pag 77).

En el orden de fallecimientos, la Comunidad de Madrid concentra la mayor parte de estos. En este sentido Leganés ha sido una de las zonas más afectadas con un número de más de 300 fallecidos por cada 100.000 habitantes, seguida de Madrid y Alcalá de Henares (entre 200 y 250). Posteriormente es posible establecer un cinturón sur y este, que poseen un número de fallecidos por encima de los 150. La zona oeste, al igual que con la incidencia acumulada ha tenido menor afección (Ver Anexo tabla 9 - Pag 78).

Que la afección de la enfermedad se de en zonas con una mayor vulnerabilidad social implica un elevado riesgo de exclusión. La emergencia se ha situado sobre todo en el sur y el sureste, implicando un aumento de la vulnerabilidad y una ampliación de la brecha social.

La dispersión del virus tiene la posibilidad de deberse a multitud de causas, que se analizarán posteriormente estableciendo el planteamiento inicial de una hipótesis que, con el paso del tiempo, y con la existencia de datos de mayor consolidación, permitirán establecer relaciones entre todas las variables cuya posible implicación en la expansión y la virulencia de la enfermedad sea de razonable vinculación.

El origen reciente de la variable, y la falta de consolidación de los datos en algunos casos, además de los escasos planteamientos y estudios revisados que hayan confirmado de forma vehemente la relación de la COVID-19 con otras variables, hace que el planteamiento realizado en este estudio sea de gran interés ya que, junto con otros estudios (Accarino et al; 2021, De Angelis et al; 2021) que estipulaban que la contaminación podía tener relación con la expansión de la COVID-19, como se intuye a partir del planteamiento en este análisis, genera la posibilidad de poder implementar estrategias aplicadas para esta y otras enfermedades.

5.6 Correlación entre temperatura y contaminación por NO₂.

Una vez analizadas las distintas variables de forma individual, se precisó la necesidad de hacer un estudio de la correlación entre las mismas.

En primer lugar, la comparativa a realizar, es la resultante de la información cartográfica obtenida. Esto permite establecer por meses una correlación visual de la distribución y la conexión que existe entre las altas temperaturas y la contaminación por NO₂.

Analizadas tanto mensual como estacionalmente y obtenida media total de ambas variables, se establece una clara correlación entre ellas, de forma que las zonas con mayor temperatura coinciden con las aquella donde mayor nivel de concentración de NO₂ existe.

Esto viene dado por que el calor no se disipa, en parte, debido a la barrera que forman las partículas que se encuentran en suspensión en el aire (Fernández García. F, 2009), así como por la ausencia de ventilación en el interior de la trama urbana siendo el resultado un aumento de la temperatura en los centros urbanos que además cuenta con el aliado de la contaminación. Es decir, si tenemos una película de micropartículas en el ambiente, sean del tipo que sean, el calor de la radiación solar no puede salir a la atmósfera por tanto son dos fenómenos que se retroalimentan.

Lo anterior, se produce debido a que, de alguna manera, las zonas con mayor temperatura, densidad de la trama urbana y población, actúan atrapando los contaminantes e impidiendo que se disipen. Además, como se ha mencionado el NO₂ aumenta en condiciones de estabilidad.

Una de las relaciones que se han podido observar es que la Isla de Calor Urbana (ICU) y el NO₂ poseen una relación más o menos estrecha con el tráfico rodado, teniendo en cuenta que en Madrid el principal origen de la contaminación es este, es posible pensar que las zonas con mayor temperatura serán además las más contaminadas.

Sin embargo, para comprobar la veracidad de los datos y de la correlación que se establece visualmente, ha sido necesario establecer perfiles trazados por los mismos puntos tanto oeste-este como norte-sur. En estos perfiles se puede observar una tendencia similar en todas las épocas del año, encontrando las zonas con mayor temperatura y contaminación en las mismas áreas.

5.7 Correlación entre temperatura y contaminación por PM_{2.5}.

El establecimiento de esta correlación no es tan evidente visualmente hablando, las zonas de mayor contaminación se desplazan hacia el este respecto a las de mayor temperatura. Esto se observa, en como el pico del contaminante se sobre la M-40 ascendiendo hasta llegar a la zona de mayor contaminación por PM_{2.5}, el Aeropuerto de Madrid-Barajas-Adolfo Suárez.

Esto se observa de la misma manera en los perfiles trazados de la misma manera que en el anterior apartado, en ellos se observa la misma tendencia a no coincidir exactamente, sino a desplazarse hacia el este.

Si podemos establecer que, existe la posibilidad, que de manera indirecta, un aumento de la temperatura puede asociarse con un incremento de las emisiones de contaminantes por el consumo mayor de energía debido a los sistemas de acondicionamiento de aire, refrigeración y conservación de alimentos y otros productos.

Este desplazamiento que se observa puede venir dado por variables como el relieve o el viento, que como se ha mencionado dotan a Madrid de unas características singulares, o, debido a la procedencia del contaminante el cual no depende en exclusiva del tráfico motorizado y si de algunos fenómenos como las nubes de polvo del Sahara, que afectan sobre todo en altitud y al PM₁₀, pudiendo existir días concretos con elevado nivel de PM_{2.5}.

5.8 Correlación entre temperatura y COVID-19.

Se trata de una de las variables con mayor problemática para establecer relaciones. Esto es debido a que el contexto actual, con restricciones sanitarias de movilidad y ocio etc.... genera factores que varían la incidencia de la COVID-19.

Se puede estimar que aún no se comprenden totalmente los mecanismos subyacentes por los que se rige la estacionalidad de las infecciones víricas respiratorias (OMS, 2021) y en el caso del coronavirus, es posible que exista una combinación de repercusiones directas en la supervivencia del patógeno, efectos en la resistencia de los seres humanos a la infección y una influencia indirecta de los factores meteorológicos y estacionales que se manifiesta en forma de cambios en la conducta de las personas.

Como se ha mencionado, existen estudios de laboratorio que han aportado algunos indicios que apuntan a una mayor supervivencia del virus en condiciones frías, secas y de baja radiación ultravioleta, pues la mayor densidad del aire frío hace aumentar la concentración de gases y partículas (Romero et al; 2010). Sin embargo, esos estudios (Burra et al; 2021) aún no han indicado si las influencias meteorológicas directas en el virus inciden de forma significativa en las tasas de transmisión en condiciones reales. Esto, podría asemejarse a los observado en este estudio, donde la incidencia sube con temperaturas bajas y desciende con temperatura altas. Sin embargo, aunque el análisis realizado durante el año 2020 muestra como al aumentar la temperatura, disminuyo la transmisión del virus en el periodo estival, se debe tener en cuenta que las medidas sanitarias establecidas durante marzo y abril (confinamiento) tuvieron que ver en ese decrecimiento de la curva de contagios, suponiendo eso la llegada al periodo estival con cifras bajas de incidencia.

A su vez, también se observa una correlación espacial entre las zonas con mayor incidencia acumulada media y las zonas más afectadas por la Isla de Calor Urbana (ICU), lo que implica que la población de esas zonas puede tener mayores afecciones de la salud debido a la contaminación y a la temperatura, y por tanto sea posible un incremento de la transmisión y gravedad de la enfermedad.

Es posible plantear la hipótesis de que la temperatura influya en el comportamiento del virus, sin embargo la estacionalidad y la influencia de la temperatura no es posible de afirmar totalmente, ya que aún no se ha establecido un porcentaje de relación veraz, debido a que las señales estacionales son difíciles de distinguir en esta fase temprana de la pandemia.

Por tanto, una vez realizado el análisis y revisados los estudios se extrae la posibilidad de que la temperatura ambiente podría afectar a la supervivencia del SARS-CoV-2 en el medio ambiente y por tanto a su transmisión siendo las bajas temperaturas y la humedad favorecedoras de su expansión, por el contrario las condiciones de alta temperatura podrían ser contraproducentes para el virus, como sucede con otros patógenos estacionales, como la gripe.

5.9 Correlación entre contaminación por NO₂ y PM_{2.5} y la COVID-19

La crisis provocada por la enfermedad COVID-19 ha ocasionado una situación de especial gravedad, sin precedentes en la sociedad moderna. Las diferentes medidas restrictivas de contacto social y de las distintas actividades económicas adoptadas por las distintas autoridades para poner freno a la transmisión del virus influyeron, en el año 2020, de manera radical en la reducción del tráfico urbano y las emisiones a la atmósfera.

En este punto, el análisis realizado del NO₂ permite sacar conclusiones evidentes respecto a la influencia de la COVID-19 en la calidad del aire. Su origen hace que su evolución se encuentre directamente ligada a las emisiones del tráfico motorizada. Es por ello su elección para este estudio, ya que se trata del mejor indicador de la repercusión de las distintas restricciones acaecidas durante el periodo analizado.

Como principal resultado de este estudio, se ha constatado que desde la declaración del estado de alarma se produjo una reducción drástica de los niveles de contaminación atmosférica por NO₂, de entre 5 y 10 µg/m³ de media desde el mes de marzo hasta el mes de octubre de 2020 (en comparación con el año 2019). Esto obedece de forma clara a la modificación sufrida en las dinámicas sociales y económicas, donde decreció de manera evidente número de desplazamientos y se aplicaron medidas como el teletrabajo. (Ver Anexo fig.69-70 - Pag 69-70)

Sin embargo, se observa que a partir de octubre se produce un incremento sobre la media del año 2019. Esto es consecuencia directa de la pandemia del coronavirus donde la importancia del transporte privado ha aumentado considerablemente. Con el fin de reducir al máximo el contacto social, el vehículo privado ha sido el más elegido para realizar desplazamientos. Por el contrario, el uso del transporte público y de coches compartidos ha disminuido significativamente en todo el mundo (Hernández et al; 2020). Lo anterior, unido a las restricciones de movilidad entre comunidades, lo que provoca un aumento del movimiento interior en estas, es la posible causa de ese aumento respecto al año 2019, más allá de otras variables como las meteorológicas y/o ambientales.

En referencia al PM_{2.5}, la tendencia es notablemente más variable. Durante el año 2020 (Ver Anexo fig.73-74 - Pag 74-75) se observa una mínima reducción de la concentración de este contaminante, aunque presenta cierta volatilidad debido a que su origen, donde también tiene influencia la variable climatológica de las nubes de polvo sahariano, así como la existencia de algunas fuentes de emisiones o la producción de energía y su uso residencial, que aunque suponen el 20% de las emisiones, hacen que estas no disminuyan de manera marcadas independientemente de que la mayor parte de la población se encuentre confinada. Lo anterior explicaría por que los niveles se han mantenido más altos durante el año 2020 (aunque más estables) que durante el año 2019, exceptuando el periodo del confinamiento.

5.10 Correlación entre la contaminación por NO₂ y PM_{2.5} y la COVID-19.

La relación entre calidad del aire y los principales indicadores de la COVID-19 es un reto, cuyo origen reciente implica cierta dificultad a la hora de establecer valoraciones irrefutables. El amplio abanico de factores que afectan de manera notoria a la enfermedad y a su transmisión, así como las distintas estrategias aplicadas de forma reciente conllevan una problemática en su análisis.

Es por ello, que este estudio plantea la hipótesis de que la calidad del aire pudiera tener cierta implicación en el aumento de la transmisión y/o de la gravedad de los síntomas de la enfermedad. Como se ha podido comprobar en la revisión de estudios previos (De Angelis et al; 2021), existen diversas investigaciones publicadas que sugieren un vínculo, y la comunidad científica maneja diversas hipótesis que explicarían esta relación. No existen evidencias, pero sí resultados preliminares plausibles, que han justificado la realización de este análisis para establecer una posible relación causal entre la mala calidad del aire y una mayor incidencia y/o gravedad de la enfermedad causada por el SARS-CoV-2.

En referencia a la relación entre el NO_2 y la incidencia acumulada por COVID-19 (fig.58-59) hemos podido observar un coeficiente de correlación r^2 inferior al 0,2 %, si bien la correlación es positiva y por tanto existe una interrelación entre las distintas variables. Esta baja correlación puede responder a una muestra reducida de casos, aunque se hayan adquirido todos los disponibles. La ampliación de esas relaciones en un futuro próximo permitirá corroborar o no las estimaciones aquí presentadas. Es posible observar, que muchas de las zonas con mayor nivel de contaminación tienen también un nivel medio de incidencia acumulada notablemente elevado, como por ejemplo, Usera o Puente de Vallecas. Aunque este estudio, plantea la posibilidad de que exista correlación entre estas dos variables, esta no permite establecer una influencia directa ya que existen terceros factores que precisan de ser analizados detenidamente y que podría falsear el vínculo. Sin embargo, una explicación a esta posibilidad radica en que, como se ha mencionado, las zonas con mayores niveles de contaminación son aquellas donde existen más enfermedades de tipo respiratorio, lo que implica que la exposición a agentes contaminantes podría dañar el sistema respiratorio e inmunológico provocando una mayor facilidad de transmisión de este tipo de virus. En cambio, es más complicado establecer relación entre el $\text{PM}_{2.5}$ (fig.60-61) y la incidencia acumulada, que como se ha observado posee un coeficiente de correlación extremadamente bajo ($r^2 < 0,02\%$) y una correlación negativa. Esto no implica que no exista algún tipo de relación entre las dos variables, si no que existen otros factores cuya influencia es posible que sea mayor y que no han sido contemplados en este estudio. Sin embargo, existen datos susceptibles de analizar, entre ellos observamos como Puente de Vallecas posee datos de una elevada incidencia y una concentración de las más altas en la gráfica, pese a ello zonas como Alcorcón y otros municipios del sur con un valor alto de incidencia acumulada, no poseen valores tan altos de $\text{PM}_{2.5}$ o Usera.

Si se analiza la variable del padecimiento grave de la enfermedad con fallecimiento, es posible establecer valoraciones similares entre los dos contaminantes analizados y la COVID-19. La lectura que se puede extraer de los estudios revisados (De Angelis. E, 2021, Marqués et al; 2021) y los resultados obtenidos plantea la posibilidad de que partículas de contaminantes influyan en una mayor incidencia o virulencia. Una concentración alta de micropartículas contaminantes en el aire causa la inflamación de las vías respiratorias, pulmonares y cardiovasculares, y la coagulación de la sangre, lo que combinado con una infección viral como la COVID-19 puede provocar un posible aumento de los casos graves de esta enfermedad.

En las gráficas (fig.59-61), podemos observar que ambos contaminantes poseen un coeficiente de correlación positiva débil ($r^2 < 0,2\%$), lo que parece implicar una cierta relación entre estas dos variables. Uno de los ejemplos es el municipio de Leganés que siendo el que mayor tasa de fallecimientos por cada 100.000 habitantes posee, se sitúa como una de las zonas con mayor índice de contaminación tanto por NO_2 como por $\text{PM}_{2.5}$. Existen también, otros ejemplos como Torrejón o Alcalá donde esta relación es bastante menos visible.

Por tanto, es posible plantear la existencia de una correlación entre la COVID-19 y la calidad del aire, lo que implicaría una herramienta importante de toma de decisiones para futuras epidemias de origen respiratorio. Sin embargo, se trata de un planteamiento que precisa de un análisis mayor en el tiempo y con mayor número y calidad de datos y estudios revisados de tal forma que se puedan refutar la hipótesis de forma 100% veraz.

Uno de los impedimentos clave es que las variables de COVID-19, como se ha mencionado, incluye factores asociados que pueden ‘falsear’ el establecimiento de un vínculo entre calidad del aire y enfermedad, como la densidad de población, la pobreza, los recursos sanitarios, el porcentaje de personas fumadoras y otras condiciones meteorológicas, entre otras. En todo caso, estas investigaciones incluyen hipótesis plausibles y resultados preliminares que apuntan a que la relación puede ser cierta, ya que hablan de mayor incidencia y mortalidad en zonas con aire más contaminado. La contaminación podría ser, un agravante que podría empeorar el estado de salud de los pacientes afectados por la pandemia.

6. CONCLUSIONES

Ciudad Futura

- La COVID-19 ha modificado la forma de entender la ciudad, el planteamiento de Smart City ha cambiado, variando los flujos económicos y sociales, y tomando un papel más relevante en el desarrollo de un futuro post pandemia. El establecimiento de correlaciones entre las diferentes variables que configuran la ciudad con la enfermedad es de vital interés, ya que permitirá establecer e implementar estrategias ante futuros acontecimientos.
- La forma de construir ciudad ha cambiado, la ciudad se dirige ahora a un modelo menos centralista, donde los espacios urbanos intermedios y los rurales tengan mayor autonomía.

Isla de Calor Urbana (ICU)

- La Isla de Calor Urbana (ICU) se da principalmente durante la noche, cuando el calor almacenado se remite a la atmósfera en forma de radiación de onda larga y aumenta la temperatura dentro de la ciudad varios grados por encima de la temperatura registrada en áreas menos urbanizadas, con diferencias en torno a los 8-11 °C entre las zonas,
- La Isla de Calor Urbana (ICU) posee un patrón, que afecta de mayor manera a las áreas más vulnerables de la ciudad, donde existe menor calidad del espacio público, calles estrechas, menor ventilación, reducida cubierta vegetal, edificios poco eficientes energéticamente hablando etc.... Cuanto mayor grado de desarrollo urbano y menos vegetación, mayor tamaño e intensidad de la isla de calor.
- El verde urbano y las zonas con densidad urbana baja o muy baja, registran las temperaturas más bajas, un ejemplo es la zona de Casa de Campo y Ciudad Universitaria. Las zonas de mayor densidad edificatoria presentan valores térmicos por encima de la media en todos los periodos de medición.
- La afección de la Isla de Calor Urbana (ICU) a zonas más vulnerables, amplifica los efectos adversos del fenómeno.
- Existe una evidente tendencia a que la Isla de Calor Urbana (ICU) se produzca de mayor manera en la zona centro y sureste de Madrid donde se observan hasta 8 °C más de temperatura que en zonas cercanas o en la periferia.
- El ámbito de estudio se encuentra ampliamente afectado por el fenómeno de inversión térmica.
- Concretamente los puntos más afectados por el incremento de temperaturas son el distrito Centro, Latina, Moratalaz, Vallecas y Carabanchel.
- La temperatura de superficie ejemplifica el concepto Isla de Frescor Diurna, al observarse, como los núcleos urbanos residenciales, poseen menor temperatura que áreas periféricas o industriales, lo que implica una mayor capacidad de absorción calorífica de los materiales de la ciudad y una mayor reflectividad de la periferia. El concepto de ICU e Isla de Frescor Urbana, se complementan ya que las zonas que más calor absorben durante el día son aquellas que mayor incremento de temperatura tienen durante la noche.

Calidad del Aire

- La calidad del aire en Madrid durante el periodo estudiado tiene una evidente tendencia a concentrarse en zonas donde hay un alto nivel de tráfico rodado, sobre todo en el caso del NO₂.
- El patrón de distribución de la contaminación en el ámbito de estudio es puramente estacional, incrementándose de mayor manera en las épocas con condiciones atmosféricas más estables, siendo el NO₂ sobre todo en invierno y el PM_{2.5} en verano. Las zonas más afectadas por la contaminación por NO₂ son Vallecas, Moratalaz, Ciudad Lineal, Centro, Carabanchel etc.... Por otro lado, las zonas más afectadas por la contaminación por PM_{2.5} son Barajas, Ciudad Lineal, San Blas, Vallecas, Moratalaz y Vicálvaro.

- Los umbrales marcados para la calidad del aire en ambos contaminantes se sobrepasaron en varias ocasiones durante el periodo de estudio, siendo el NO₂ el que más veces fue superado, en mucha mayor proporción que el PM_{2.5}.
- La reducción de la contaminación por NO₂ debido a la pandemia y las medidas sanitarias implementadas es evidente, reduciéndose durante el confinamiento entre 5-10 puntos de media entre 2020 y 2019. A su vez, la calidad del aire empeoró de forma en el tramo final del año respecto 2019, debido fundamentalmente al aumento del uso del coche privado y a la restricción de movilidad entre comunidades, lo que implicaba un aumento de los desplazamientos en el interior de estas.

COVID-19

- La COVID-19 ha afectado al ámbito de estudio de forma evidente, tratándose de una de las zonas a nivel nacional con mayor incidencia y fallecimientos por el virus.
- La enfermedad ha afectado de una mayor manera a zonas del sur y sureste del ámbito de estudio, que a su vez son zonas con mayor vulnerabilidad social, lo que implica un aumento de posibilidad de riesgo de exclusión.
- El origen reciente del patógeno complica la confirmación de hipótesis, pero permite establecer y observar relaciones y tendencias acerca de las correlaciones de este con otras variables.
- Existe una evidente correlación entre la contaminación por NO₂ y la temperatura, observándose un incremento relacional de ambas.
- La relación de la temperatura con el PM_{2.5}, no es, en este estudio, tan evidente, produciéndose un ligero desplazamiento del contaminante respecto a la primera.
- Pese a la imposibilidad de comprobar todos los factores subyacentes a la COVID-19, se puede plantear la posibilidad de una estacionalidad de la enfermedad, que se vea afectada por la variable de la temperatura y que afecte en menor medida, cuando estas sean más elevadas
- Se observa una evidente correlación entre las zonas con mayor incidencia acumulada media y la Isla de Calor Urbana (ICU), lo que puede dar lugar a que la calidad de la salud de esas zonas sea menor y por tanto favorezca el desarrollo de la enfermedad.
- La relación del PM_{2.5} con la pandemia a nivel de reducción de este no es tan evidente, pese a que durante el confinamiento los niveles se redujeron.
- No existen evidencias, pero sí resultados preliminares plausibles, que han justificado que permiten establecer una posible relación causal entre la mala calidad del aire y una mayor incidencia y/o gravedad de la enfermedad causada por el SARS-CoV-2.
- Existe una correlación positiva entre la incidencia acumulada, fallecimientos y la contaminación por NO₂, de tal manera que es posible que la salud de la población en zonas de baja calidad del aire implique una mayor transmisión del virus. Esto no es visible en toda el área de estudio, sin embargo, al existir otros factores, sólo es posible plantear una tendencia relacional entre variables.
- Existe una correlación positiva entre los fallecimientos y la contaminación por PM_{2.5}, lo que implica probablemente que la exposición al contaminante influye en la salud, causando enfermedades cardiopulmonares que pueden suponer comorbilidades para el padecimiento grave de la COVID-19.
- La COVID-19, incluye factores asociados que pueden ‘falsear’ el establecimiento de un vínculo entre calidad del aire y enfermedad.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Accarino, G., Lorenzetti, S., & Aloisio, G. (2021). Assessing correlations between short-term exposure to atmospheric pollutants and COVID-19 spread in all Italian territorial areas. *Environmental Pollution*, 268, 115714.
- Alvarado, J. M. G., González, M. E. P., & Rodríguez, M. D. P. G. (2020). Sellado de suelos, fragmentación y conectividad ecológica en la conurbación de Madrid (España). *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (85), 4.
- Bathmanabhan, S., & Saragur Madanayak, S. N. (2010). Analysis and interpretation of particulate matter - PM₁₀, PM_{2.5} and PM₁ emissions from the heterogeneous traffic near an urban roadway. *Atmospheric Pollution Research*, 1(3), 184–194.
- Benavides, J. C. (2020). *COVID-19 efectos de la cuarentena sobre la calidad del aire en Quito*. 116.
- Bernabé, A. C. (2020). Interpolación espacial de la temperatura mínima diaria mediante krigueado. *Acta de las Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española*, 33(1).
- Buendía Martínez, J. M. (n.d.). *Logística Sostenible: Estudio de la Calidad del Aire e interacción sobre la Movilidad Urbana*. 113.
- Burra, P., Soto-Díaz, K., Chalen, I., González-Ricon, R. J., Istanto, D., & Caetano-Anollés, G. (2021). Temperature and Latitude Correlate with SARS-CoV-2 Epidemiological Variables but not with Genomic Change Worldwide. *Evolutionary Bioinformatics*, 17.
- Cañada Torrecilla, R., & Moreno Jiménez, A. (2015). Monitoreo con SIG de la calidad de la atmósfera urbana para la gobernanza local: el caso de Madrid. *Ciencias Espaciales*, 8(2), 431–451.
- Cañada Torrecillas, V., García, F. F., & Martilli, A. (2012). El clima urbano: aspectos generales y su aplicación en el área de Madrid. *Revista Indice* (50), 21-24.
- Capdepón, F. P. (2015). La evolución de la imagen literaria del paisaje urbano: de la ciudad moderna a la ciudad actual The evolution of the literary image of the urban landscape: from the modern city to the city today. *Estudios Geográficos*, 285.
- De Angelis, E., Renzetti, S., Volta, M., Donato, F., Calza, S., Placidi, D., Lucchini, R. G., & Rota, M. (2021). COVID-19 incidence and mortality in Lombardy, Italy: An ecological study on the role of air pollution, meteorological factors, demographic and socioeconomic variables. *Environmental Research*, 195, 110777.
- D'innocenzio, F., Difilippo, P., & Lepore, L. e. (1998). PM₁₀ and PM_{2.5} concentrations in Urban Air Size Fraction Distribution of Toxic Metals. *Annali Di Chimica*, 88, 281–289.
- De Sá, S. S., Palm, B. B., Campuzano-Jost, P., Day, D. A., Newburn, M. K., Hu, W., Isaacman-VanWertz, G., Yee, L. D., Thalman, R., Brito, J., Carbone, S., Artaxo, P., Goldstein, A. H., Manzi, A. O., Souza, R. A. F., Mei, F., Shilling, J. E., Springston, S. R., Wang, J., ... Martin, S. T. (2017). Influence of urban pollution on the production of organic particulate matter from isoprene epoxydiols in central Amazonia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(11), 6611–6629.
- Domingo, J. L., Marquès, M., & Rovira, J. (2020). Influence of airborne transmission of SARS-CoV-2 on COVID-19 pandemic. A review. *Environmental Research*, 188(June), 17–20.
- El, E. N., Del, U., Xxi, S., Socioeconómica, I., Región, D. E. U. N. A., & Inmigrantes, R. D. E. (2003). Atlas de la Comunidad de Madrid en el umbral del siglo XXI. *Investigaciones Geográficas*, 51, 151–152.
- Escolano-Utrilla, S., López-Escolano, C., & Pueyo-Campos, Á. (2018). Urbanismo neoliberal y fragmentación urbana: el caso de Zaragoza (España) en los primeros quince años del siglo XXI. *EURE (Santiago)*, 44(132), 185-212.
- Fattorini, D., & Regoli, F. (2020). Role of the chronic air pollution levels in the Covid-19 outbreak risk in Italy. *Environmental Pollution*, 264, 114732.
- Fernández García, Felipe. "Ciudad y cambio climático: aspectos generales y aplicación al área metropolitana de Madrid". *Investigaciones Geográficas*. N. 49 (mayo-ag. 2009). ISSN 0213-4691, pp. 173-195

- González, M. Á., Arasa, R., Gámez, P., Picanyol, M., & Campa, P. (2019). Effects of increasing the surface reflectance over air quality levels using WRF-BEM/AEMM/CMAQ: application over the city of Madrid. *International Journal of Environment and Pollution*, 65(1-3), 195-210.
- García, F. F. (2005). Contaminación atmosférica y calidad del aire en Madrid: Análisis de las concentraciones de SO₂, CO, NO₂, ozono y PM₁₀ (1980-2003). *Estudios Geográficos*, 66(259), 507-532.
- Hernández, R. C., Ramírez, C. F., Aja, A. H., Salgado, G. S. T., & Gómez, J. M. (2020). Áreas Urbanas frente a Barrios. Análisis de las características urbanas ante el reto de la ciudad post-COVID19: el caso de Madrid. *Ciudad y territorio: Estudios territoriales*, (205), 665-684.
- Holgado, E. B., & Bustamante, P. R. (2015). Los Sistemas de Información Geográfica y las ciudades inteligentes. *Polígonos. Revista de Geografía*, (27), 257-270.
- Hutter, H. P., Poteser, M., Moshhammer, H., Lemmerer, K., Mayer, M., Weitensfelder, L., Wallner, P., & Kundi, M. (2020). Air pollution is associated with covid-19 incidence and mortality in Vienna, Austria. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(24), 1–11.
- Huang, G., & Brown, P. E. (2021). Population-weighted exposure to air pollution and COVID-19 incidence in Germany. *Spatial Statistics*, 41, 100480.
- Khomenko, S., Cirach, M., Pereira-Barboza, E., Mueller, N., Barrera-Gómez, J., Rojas-Rueda, D., de Hoogh, K., Hoek, G., & Nieuwenhuijsen, M. (2021). Premature mortality due to air pollution in European cities: a health impact assessment. *The Lancet Planetary Health*, 5(3), e121–e134.
- Kolluru, S. S. R., Patra, A. K., Nazneen, & Shiva Nagendra, S. M. (2021). Association of air pollution and meteorological variables with COVID-19 incidence: Evidence from five megacities in India. *Environmental Research*, 195(January), 110854.
- Li, H., Xu, X. L., Dai, D. W., Huang, Z. Y., Ma, Z., & Guan, Y. J. (2020). Air pollution and temperature are associated with increased COVID-19 incidence: A time series study. *International Journal of Infectious Diseases*, 97, 278–282.
- Luna Nemecio, J., & Tobón, S. (2021). Urbanización sustentable y resiliente ante el Covid-19: nuevos horizontes para la investigación de las ciudades. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(1), 110-118.
- Martínez-Escobar, J., Fernández Sánchez, A., Pérez-González, M., Úbeda, José. (2021). Analysis of Pollutant Dynamics (NO₂ -PM_{2.5}) in the Madrid Metropolitan Area from the Monitoring of the Heat Islands. Conference Proceedings, Dubai UAE Mar 22-23, 2021, Part X.
- Marqués, M., Rovira, J., Nadal, M., & Domingo, J. L. (2021). Effects of air pollution on the potential transmission and mortality of COVID-19: A preliminary case-study in Tarragona Province (Catalonia, Spain). *Environmental Research*, 192(October 2020).
- Medina, G. V. (2017). Determinación de la correlación entre PM_{2.5} y PM₁₀ en el distrito de San Isidro en Lima-Perú (2016). Universidad Científica del Sur.
- Miranda Tustón, G. L. (2017). Evaluación del comportamiento de los contaminantes atmosféricos O₃, NO₂ y COVs en el efecto fin de semana en el Centro Histórico de la ciudad de Riobamba (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- Moreno Jiménez, A., & Méndez Arranz, D. (2020). La concentración de partículas en el aire: análisis estadístico de la relación espacial entre medidas de superficie y del sensor MODIS para dos tipos de tiempo en la Comunidad de Madrid.
- Núñez Peiró, M., Román López, E., Sánchez-Guevara Sánchez, C., & Neila González, F. J. (2016). Hacia un modelo dinámico para la isla de calor urbana de Madrid = Towards a Dynamic Model for the Urban Heat Island of Madrid. *Anales de Edificación*, 2(1), 49.
- Palacios, G. (2000). *Aplicación Geográfica de los SIG al Estudio de la Contaminación Atmosférica en el Ámbito Local*. 608–622.
- Pires, E. G., & FERREIRA JÚNIOR, L. G. (2015). Mapeamento da temperatura de superfície a partir de imagens termais dos satélites Landsat 7 e Landsat 8. *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, XVII*, 7421-7428.

- Pérez González, M.^a E.; García Rodríguez, M.^a P. y Guerra Zaballos, A. 2003. Análisis del clima urbano a partir de imágenes de satélite en el centro peninsular español. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 23: 187-206.
- Rasilla, D., Allende, F., Martilli, A., & Fernández, F. (2019). Heat waves and human well-being in Madrid (Spain). *Atmosphere*, 10(5), 288
- Román, E., Gómez, G., & de Luxán, M. (2017). Urban heat Island of Madrid and its influence over urban thermal comfort. In *Sustainable development and renovation in architecture, urbanism, and engineering* (pp. 415-425). Springer, Cham.
- Saez, M., Tobias, A., & Barceló, M. A. (2020). Effects of long-term exposure to air pollutants on the spatial spread of COVID-19 in Catalonia, Spain. *Environmental Research*, 191(September).
- Sarrat, C., Lemonsu, A., Masson, V., & Guedalia, D. (2006). Impact of urban heat island on regional atmospheric pollution. *Atmospheric Environment*, 40(10), 1743–1758.
- Secchi, B. (2004). Ciudad moderna, ciudad contemporánea y sus futuros. *Lo urbano en*, 20.
- Sikora-Fernández, D. (2017). Factores de desarrollo de las ciudades inteligentes. *Revista Universitaria de Geografía*, 26(1), 135-152
- Ulpiani, G. (2021). On the linkage between urban heat island and urban pollution island: Three-decade literature review towards a conceptual framework. *Science of the Total Environment*, 751, 141727.
- Wang, J., & Ogawa, S. (2015). Effects of meteorological conditions on PM2.5 concentrations in Nagasaki, Japan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 12(8), 9089–9101.
- Wu, X., Nethery, R. C., Sabath, M. B., Braun, D., & Dominici, F. (2020). Air pollution and COVID-19 mortality in the United States: Strengths and limitations of an ecological regression analysis. *Science advances*, 6(45), eabd4049.
- Xing, Y. F., Xu, Y. H., Shi, M. H., & Lian, Y. X. (2016). The impact of PM2.5 on the human respiratory system. *Journal of Thoracic Disease*, 8(1), E69–E74.
- Yunus, R. M., & Zulina Zubairi, Y. (2019). A probability distribution-based approach to impute missing values in hourly PM10 concentration. *Integrated Catchment Assessment and Management (ICAM)*, 10, 6.
- Zheng, Z., Ren, G., Wang, H., Dou, J., Gao, Z., Duan, C., Li, Y., Ngarukiyimana, J. P., Zhao, C., Cao, C., Jiang, M., & Yang, Y. (2018). Relationship Between Fine-Particle Pollution and the Urban Heat Island in Beijing, China: Observational Evidence. *Boundary-Layer Meteorology*, 169(1), 93–113

Recursos Web

- Survey, U.-U. G. (s. f.). *Earth Explorer*. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- A.E.M.E.T. (s. f.). *Datos climatológicos*. Agencia Estatal de Meteorología - AEMET. Gobierno de España. <http://www.aemet.es/es/serviciosclimaticos/datosclimatologicos>.
- *Datos abiertos*. (s. f.-b). Comunidad de Madrid. <https://www.comunidad.madrid/gobierno/datos-abiertos>
- *Centro de Descargas del CNIG (IGN)*. (s. f.). Centro de Descargas del CNIG, de <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/index.jsp>
- *Portal de datos abiertos del Ayuntamiento de Madrid*. (s. f.-b). Datos Abiertos Ayto. de Madrid. <https://datos.madrid.es/portal/site/egob/>
- *Meteoclimatic*. (s. f.). Meteoclimatic. <https://www.meteoclimatic.net/>

8. ANEXO

8.1 Isla de Calor Urbana (ICU) en el Área Metropolitana de Madrid.

ESTACIONES	ALTURA	ALTITUD- ALTITUD MÍNIMA MDT	GTVenero	GTVfebrero	GTVmarzo	GTVabril	GTVmayo	GTVjunio	GTVjulio	GTVagosto	GTVseptie	Gtvoctu	GtvNov	GtvDic
Buitrago	1026	594	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Robledo de Chavela	790	358	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Torrejón de Ardoz	568	136	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Puerto de Navacerrada	1894	1462	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Puerto del León	1532	1100	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Colmenar Viejo	1004	572	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Retiro	667	235	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Ciudad Universitaria	664	232	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Getafe	620	188	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Cuatro Vientos	690	258	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Aeropuerto de Barajas	609	177	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Aranjuez	540	108	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Guadalajara	721	289	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Rivas_Vaciamadrid	651	219	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Arturo_Soria	728	296	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Parque Avenidas	621	189	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
El Goloso	740	308	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
J.M.D.Moratalaz	687	255	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
J.M.D.Villaverde	594	162	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
CM de Acústica	566	134	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
J.M.D. Hortaleza	587	155	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Peñagrande	715	283	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
J.M.D Chamberí	660	228	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
J.M.D. Centro	678	246	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
J.M.D Vallecas	607	175	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Matadero	570	138	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Plaza España	637	205	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Escuelas Aguirre	672	240	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Farolillo	646	214	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Casa de Campo	660	228	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Plaza del Carmen	671	239	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Moratalaz	699	267	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Cuatro Caminos	676	244	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Ensanche de Vallecas	629	197	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Plaza Elíptica	605	173	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
El Pardo	612	180	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392
Parque Juan Carlos Primero	660	228	0.0041	0.00498	0.00548	0.00628	0.00651	0.00671	0.00636	0.00601	0.00582	0.00529	0.00478	0.00392

Tabla 1. Cálculo GTV Temperatura Standard. Fuente: Elaboración propia

Enlace: <https://drive.google.com/drive/folders/1KCQcL9PlamFgVvvv6NUtDM4QzM0uHGrG?usp=sharing>

ESTACIONES	TmpStENERO	TmpStFEBRERO	TmpStMARZO	TmpStABRIL	TmpStMAYO	TmpStJUNIO	TmpStJULIO	TmpStAGOSTO	TmpStSEPTIEMBRE	TmpStOCTUBRE	TmpStNOVIEMBRE	TmpStDICIEMBRE	TmpSTMedia
Buitrago	0.63	3.95	6.57	9.73	10.63	13.91	18.46	16.04	13.49	9.33	6.78	3.95	9.46
Robledo de Chavela	2.73	4.64	6.62	9.01	12.31	16.32	21.11	19.27	15.83	10.84	7.69	4.47	10.90
Torrejón de Ardoz	0.76	1.40	4.02	7.52	10.64	14.14	19.24	17.45	14.23	8.59	6.03	2.70	8.89
Puerto de Navacerrada	4.46	8.00	7.68	9.89	15.13	17.82	23.00	20.60	17.42	12.01	7.86	4.81	12.39
Puerto del León	3.07	6.60	6.25	8.93	13.21	16.26	21.33	19.54	16.04	10.85	7.31	4.48	11.16
Colmenar Viejo	4.98	7.32	8.26	9.95	14.30	18.00	22.91	21.22	17.47	12.13	8.47	5.75	12.56
Retiro	3.77	6.49	8.00	9.82	14.28	18.20	22.75	20.77	16.99	11.68	8.51	5.86	12.26
Ciudad Universitaria	1.21	3.05	5.55	8.50	11.84	18.48	21.01	18.84	15.17	8.74	6.83	4.51	10.31
Getafe	2.34	4.82	7.09	9.42	14.03	18.20	22.78	20.72	17.04	11.05	8.12	5.11	11.73
Cuatro Vientos	3.05	5.62	7.37	9.75	13.87	17.79	22.44	20.63	16.68	11.13	8.13	5.26	11.81
Aeropuerto de Barajas	0.78	2.26	5.21	8.54	12.04	15.89	20.60	18.63	14.86	9.34	6.87	3.81	9.90
Aranjuez	-0.59	1.35	4.23	7.47	11.32	14.28	19.48	17.50	13.95	8.29	6.26	3.12	8.89
Guadalajara	2.19	4.29	6.28	9.24	12.59	16.61	20.90	19.32	15.49	10.20	7.43	4.33	10.74
Rivas_Vaciamadrid	2.90	5.19	6.90	9.33	13.28	17.37	21.79	20.02	16.07	10.96	7.95	5.06	11.40
Arturo_Soria	4.61	6.82	8.37	10.56	14.73	18.79	23.43	21.23	17.22	12.27	9.11	6.36	12.79
Parque Avenidas	3.77	5.34	7.84	8.99	13.33	18.57	22.80	21.24	16.90	13.10	8.10	5.84	12.15
El Goloso	1.06	3.18	5.29	8.63	12.11	15.77	20.46	18.95	14.89	9.68	6.87	3.31	10.02
J.M.D.Moratalaz	2.14	4.34	6.33	7.94	14.34	16.29	20.70	19.11	14.82	9.90	6.56	3.99	10.54
J.M.D.Villaverde	0.47	2.99	6.17	7.80	14.08	15.88	20.49	18.29	14.38	8.91	6.16	3.74	9.95
CM de Acústica	-1.50	0.06	4.11	6.87	10.28	12.90	18.05	14.71	12.38	6.45	5.09	2.94	7.70
J.M.D. Hortaleza	2.51	4.55	6.58	8.25	14.44	15.97	20.47	18.67	14.57	6.96	6.23	4.69	10.32
Peñagrande	1.73	4.24	6.73	8.05	15.51	16.80	21.37	19.80	15.94	10.67	7.76	4.76	11.11
J.M.D Chamberí	7.10	9.37	11.97	12.30	18.69	20.29	24.97	23.31	18.83	14.32	10.80	8.35	15.02
J.M.D. Centro	4.97	7.35	9.83	11.54	20.45	20.23	23.88	22.06	18.13	13.03	9.82	7.28	14.05
J.M.D Vallecas	4.78	6.92	9.77	11.46	17.88	19.50	24.15	22.61	18.43	13.26	9.87	7.17	13.82
Matadero	3.30	5.57	8.42	10.88	17.56	19.84	24.45	21.30	17.36	11.81	9.27	6.84	13.05
Plaza España	1.73	4.47	6.91	9.51	18.01	19.82	23.84	21.25	16.83	11.49	8.64	5.97	12.37
Escuelas Aguirre	5.25	7.74	9.49	11.14	17.83	19.03	23.99	21.63	18.25	13.22	9.99	7.88	13.79
Farolillo	3.50	5.82	9.17	10.32	17.93	19.45	24.33	22.17	18.10	12.42	9.76	6.95	13.33
Casa de Campo	1.66	3.72	7.29	9.76	15.96	18.59	21.73	19.74	16.06	10.35	5.35	5.46	11.31
Plaza del Carmen	5.50	8.04	9.66	11.57	18.46	18.78	22.14	23.06	18.85	13.73	10.23	7.52	13.96
Moratalaz	4.42	6.60	8.81	11.00	16.93	19.75	23.62	21.92	17.66	12.74	9.60	6.91	13.33
Cuatro Caminos	5.24	7.76	9.46	11.06	17.94	19.08	24.39	21.98	18.39	13.32	9.83	7.01	13.79
Ensanche de Vallecas	3.90	6.29	8.70	10.59	16.69	18.92	23.16	21.55	17.55	12.40	9.17	6.46	12.95
Plaza Elíptica	3.51	5.88	8.68	10.82	17.62	18.70	22.96	21.24	17.65	12.20	9.29	6.65	12.93
El Pardo	0.73	2.12	5.40	8.43	12.70	14.70	19.54	16.97	14.59	9.24	7.57	4.97	9.75
Parque Juan Carlos Primero	2.97	4.86	7.62	10.10	15.24	17.59	21.75	19.16	16.19	11.25	8.55	5.92	11.77

Tabla 2. Temperatura Standard Estaciones Área de Estudio. Fuente: Elaboración propia

Enlace: <https://drive.google.com/drive/folders/1KCQcL9PlamFgVvvv6NUtDM4QzM0uHGrG?usp=sharing>

TIPO	INTERPOLACIÓN	POLINOMIO	VORONOI	ANISOTROPÍA	HISTOGRAMA	AJUSTE	SVSEARCH	OPTIMIZE	MODELO	NUGGET	LAG
SIMPLE KRIGGING	Enero	SEGUNDO	OK	Falsa	None	OK	91,3	NO	JBESSEL	0,75194963724499	0,0075575276948338
SIMPLE KRIGGING	Febrero	SEGUNDO	OK	Falsa	box cox 1,2	OK	91,2	NO	RQUADRATIC	0,35399564138166	0,00660280777637741
SIMPLE KRIGGING	Marzo	SEGUNDO	OK	Falsa	box cox 1,1	OK	93	NO	RQUADRATIC	0,059471093666936	0,00751279105950788
SIMPLE KRIGGING	Abril	SEGUNDO	OK	Falsa	Box cox 0,9	OK	289,9	NO	RQUADRATIC	0,058539606058576	0,0068846819615693
SIMPLE KRIGGING	Mayo	SEGUNDO	OK	Falsa	box cox 0,1	OK	32,8	NO	RQUADRATIC	0,004703094559576	0,00690280777637741
SIMPLE KRIGGING	Junio	SEGUNDO	OK	Falsa	box cox 2,9	OK	188,5	NO	JBESSEL	59368.3495097041	0,00544861794272883
SIMPLE KRIGGING	Julio	SEGUNDO	OK	Falsa	box cox 2,3	OK	260,3	NO	RQUADRATIC	3338.834419557820	0,00631710523623641
SIMPLE KRIGGING	Agosto	SEGUNDO	OK	Falsa	box cox 2,9	OK	NO	NO	KBESSEL	62703.81721588280	0,00541279105950788
SIMPLE KRIGGING	Septiembre	SEGUNDO	OK	Falsa	box cox 2,9	OK	73,1	NO	RQUADRATIC	25110.91497831400	0,00654861794272883
SIMPLE KRIGGING	Octubre	SEGUNDO	OK	Falsa	box cox 2,4	OK	74,1	NO	RQUADRATIC	500.5679213937	0,00641279105950788
SIMPLE KRIGGING	Noviembre	SEGUNDO	OK	Falsa	box cox 1,5	OK	144,6	NO	KBESSEL	4.472130891241400	0,0064846819615693
SIMPLE KRIGGING	Diciembre	SEGUNDO	OK	Falsa	box cox 0,8	OK	44,4	NO	RQUADRATIC	0,00813847290639	0,00655403812969093
SIMPLE KRIGGING	Media	SEGUNDO	OK	Falsa	box cox 1,4	OK	118,2	NO	RQUADRATIC	7.4733676609019000	0,00641279105950788

Tabla 3. Interpolaciones *Kriging* Temperatura. Fuente: Elaboración propia

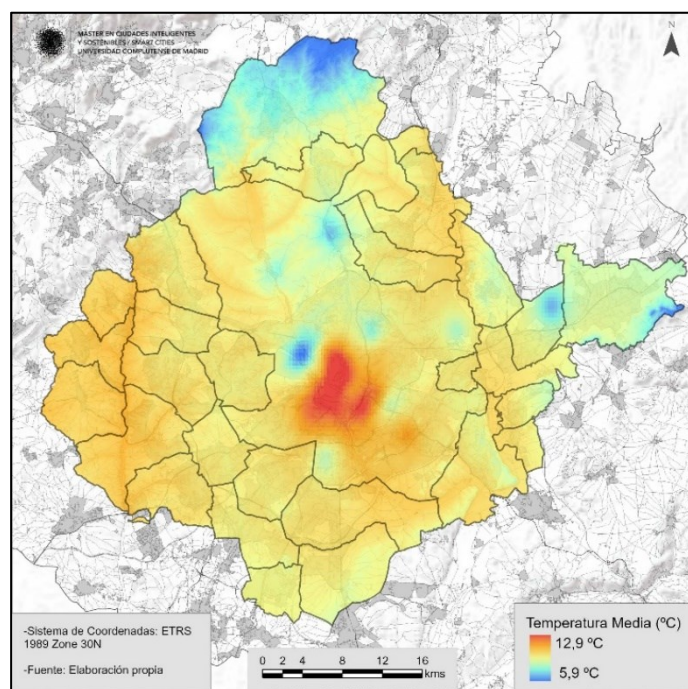


Figura 62. Media (2019-2020) Isla de Calor Urbana (ICU) del Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

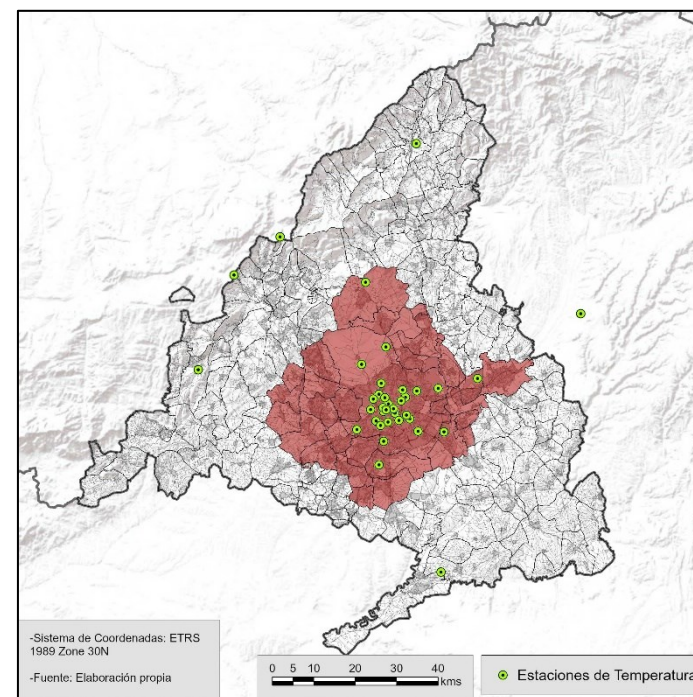


Figura 63. Media (2019-2020) Isla de Calor Urbana (ICU) del Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

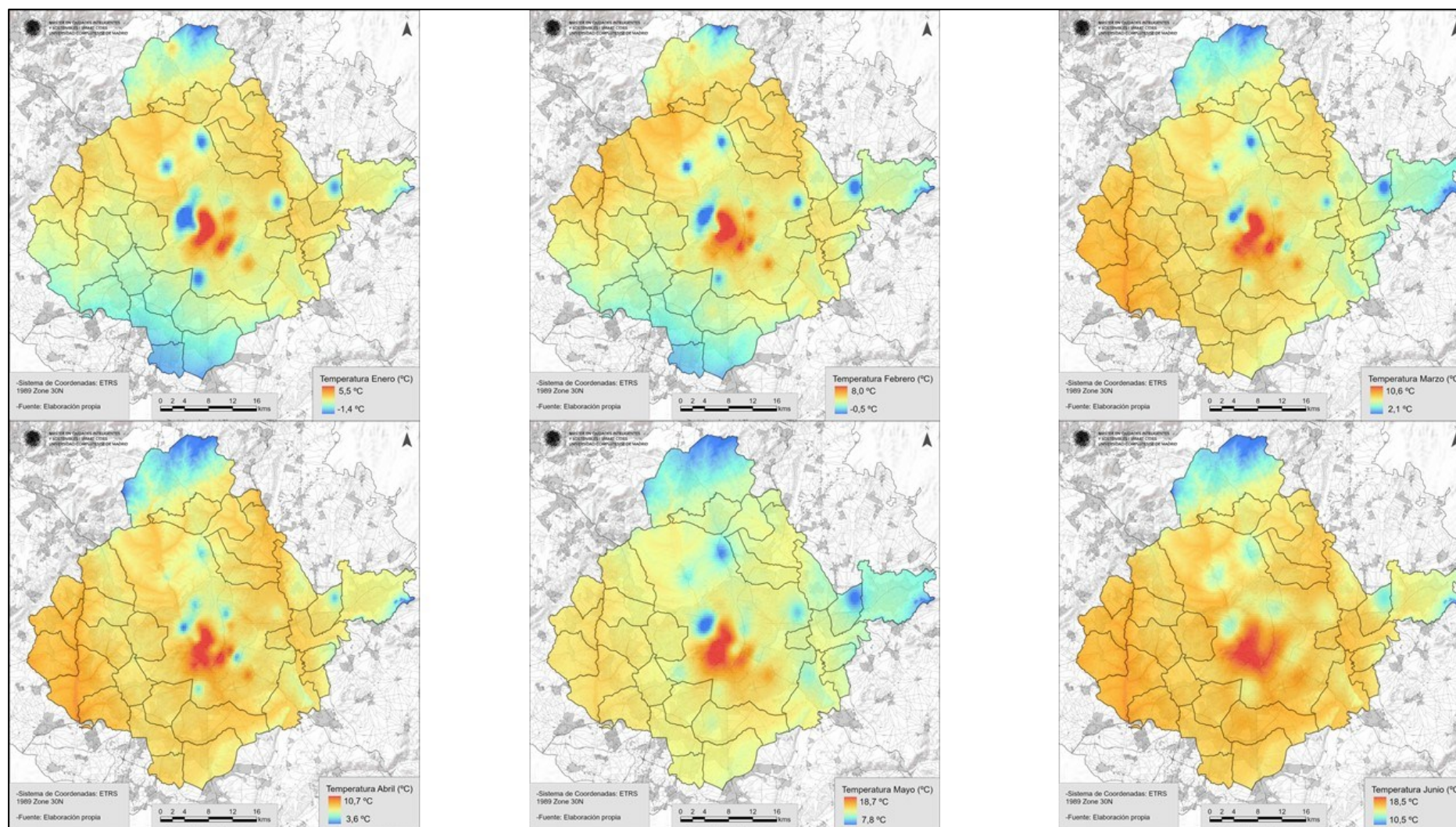


Figura 64. Evolución Enero-Junio Isla de Calor Urbana (ICU) del Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

Enlace: https://drive.google.com/drive/folders/1k_QWINssvplK4sOb6VFPmtgdQiygXqTx?usp=sharing

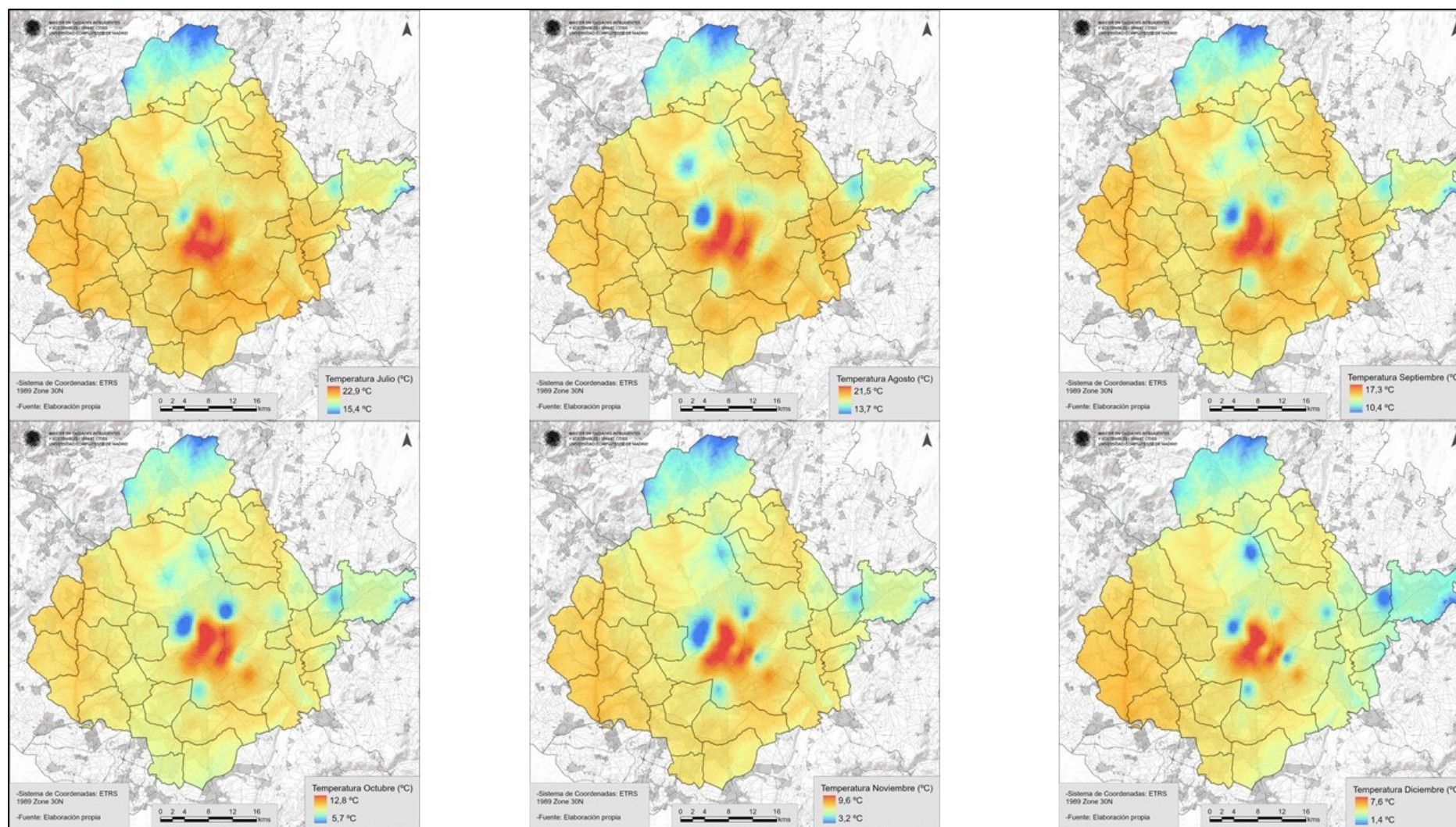


Figura 64. Evolución Julio-Septiembre Isla de Calor Urbana (ICU) del Área Metropolitana de Madrid. Fuente: Elaboración propia

Enlace: https://drive.google.com/drive/folders/1k_QWINssvPLK4sOb6VFPmtgdQiygXqTx?usp=sharing

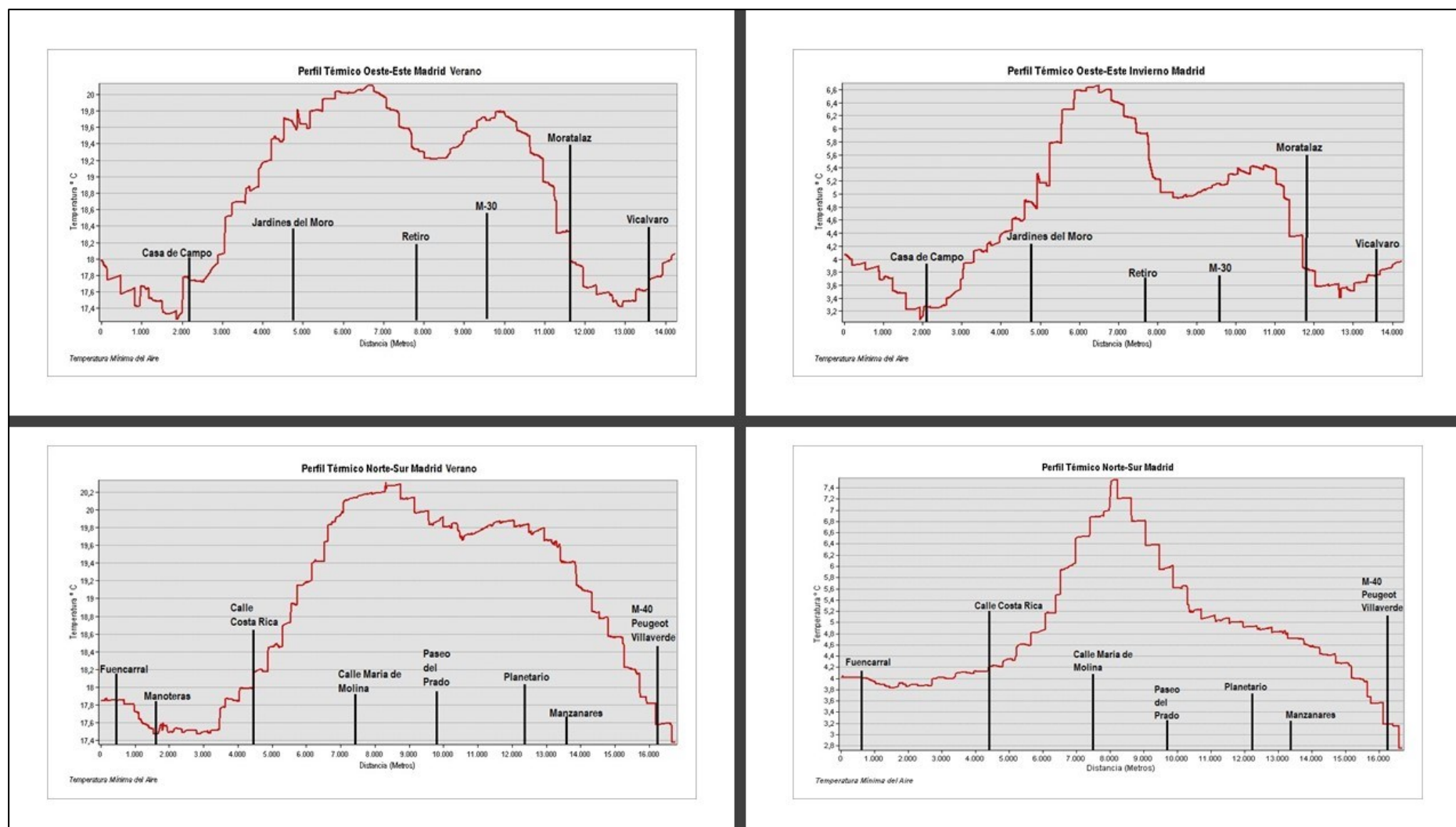


Figura 65. Comparación Isla de Calor Urbana (ICU) Invierno-verano de la ciudad de Madrid. Fuente: Elaboración propia

Enlace: <https://drive.google.com/drive/folders/1Pxq9wUI1DwvIEBAHqiN2NTdnWSlXgW8?usp=sharing>

8.2 Temperatura de Superficie en el Área Metropolitana de Madrid.

Localización	Tipología	Invierno	Primavera	Verano	Media
Retiro	<i>Zona Verde</i>	10.7	15.87	17.12	14.5
Fuencarral-Estación	<i>Ferroviaria</i>	12.1	18.76	20.44	17.93
Puerta del Sol	<i>Plaza</i>	11.75	18.38	19.81	16.63
Mercamadrid	<i>Logística</i>	14.1	21.5	23.26	20.04
Venta de la Rubia	<i>Forestal</i>	11.18	17.06	18.43	15.51
Cuatro Torres Bussines Area	<i>Edificaciones</i>	10.36	16.85	18.61	15.63
Wanda Metropolitano	<i>Deportiva</i>	10.39	16.05	18.15	15.64
Hospital Puerta de Hierro	<i>Edificación Sanitaria</i>	14.62	20.52	21.34	16.37
La Moraleja	<i>Urbanización</i>	10.82	16.74	17.95	15.07
Nudo Sur M-40	<i>Infraestructura Vial</i>	12.47	19.4	21.25	17.6
Puerta de Atocha	<i>Ferroviaria</i>	13.55	20.41	21.34	18.35
Avenida de América	<i>Plaza</i>	11.84	18.8	20.58	16.44
Casa de Campo	<i>Zona Verde</i>	12.13	19.79	21.25	16.46

Tabla 3. Valores de la ciudad de Madrid. Fuente: Elaboración propia

Enlace: <https://drive.google.com/drive/folders/18WRNe6V1xkYJaHqNy9RRr8KF7ly1s0F4?usp=sharing>

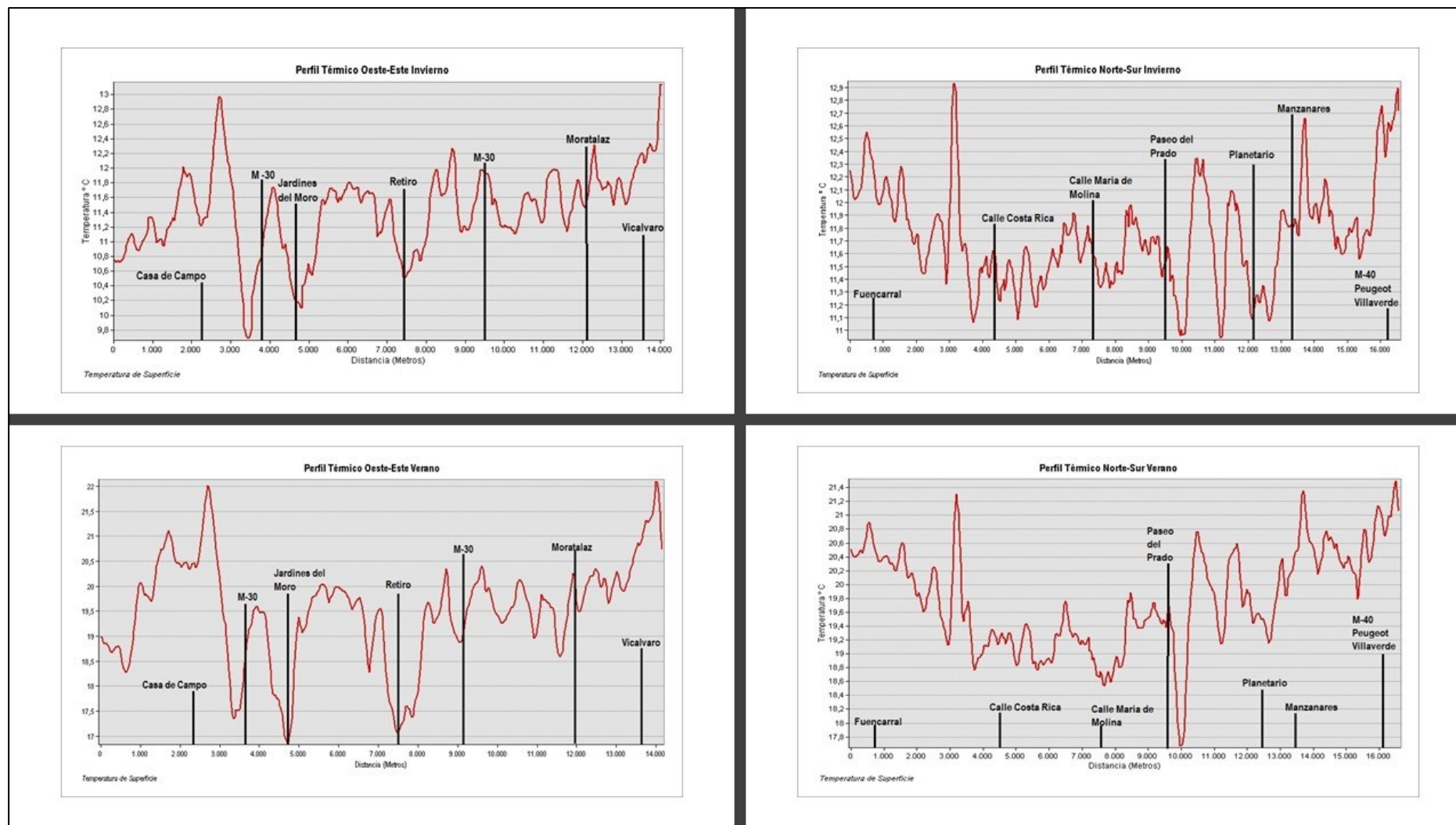


Figura 66. Comparación Temperatura de Superficie Invierno-verano de la ciudad de Madrid. Fuente: Elaboración propia

Enlace: <https://drive.google.com/drive/folders/1PxFq9wUI1DwvIEBAHqiN2NTdnWSlXgW8?usp=sharing>

8.3 Contaminación por NO₂ (Dióxido de Nitrógeno) en el Área Metropolitana de Madrid.

Estación	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Aeropuerto de Barajas	56.40	51.65	33.05	20.13	18.38	19.47	22.34	26.71	30.45	37.79	33.53	37.66
Alcalá de Henares	41.74	37.57	25.38	15.69	15.46	16.39	20.13	23.16	23.83	28.91	24.92	31.08
Alcobendas	41.39	38.45	21.63	14.20	12.46	13.73	14.72	19.74	20.55	29.48	25.69	29.43
Alcorcón	34.75	20.46	16.63	9.89	10.82	9.08	11.72	11.95	16.02	17.81	21.87	20.32
Aranjuez	17.95	14.34	10.05	6.05	5.81	5.96	6.96	8.54	8.65	10.79	11.20	11.36
Arganda del Rey	20.58	20.74	14.35	7.21	6.98	8.14	9.71	10.94	11.95	14.36	14.81	13.50
Arturo Soria	50.03	45.26	28.44	19.35	15.34	18.99	18.21	20.74	28.88	35.26	33.71	35.92
Avenida Ramón y Cajal	56.90	54.04	32.22	22.63	21.31	26.44	29.81	27.16	34.55	40.79	37.69	40.76
Barrio de Pilar	54.34	52.46	29.98	17.75	16.34	20.14	22.98	24.27	29.14	38.31	31.94	37.31
Calle Farolillo	51.10	47.40	28.89	18.11	16.77	18.16	21.31	23.11	26.82	35.40	32.69	28.08
Casa de Campo	35.03	32.56	16.94	9.62	8.73	9.41	11.90	13.03	18.22	22.07	19.75	17.03
Colmenar Viejo	26.48	20.94	11.58	7.37	8.88	8.69	9.51	10.13	12.02	14.11	16.26	19.18
Coslada	36.89	35.89	24.21	15.62	14.97	14.72	17.30	19.21	22.25	26.03	24.92	36.57
Cuatro Caminos	58.03	50.86	31.08	20.28	19.53	20.99	22.02	20.53	32.73	40.56	40.89	19.72
El Pardo	23.97	20.05	12.03	7.79	7.37	10.00	11.89	12.71	14.45	18.16	14.63	30.14
Ensanche de Vallecas	56.98	52.71	33.35	22.90	22.44	21.56	23.79	26.45	31.15	37.45	35.98	38.10
Escuelas Aguirre	65.21	60.93	44.63	31.42	30.81	32.91	33.37	26.71	40.24	46.41	44.94	29.06
Fuenlabrada	37.79	32.91	21.15	11.89	10.66	9.91	12.67	13.08	18.41	20.12	24.58	17.03
Getafe	36.14	32.75	19.52	11.35	11.69	11.58	15.06	17.08	21.23	24.26	25.54	18.15
Leganés	39.00	34.84	21.79	12.58	13.39	13.73	17.01	19.23	25.08	26.29	27.92	21.31
Majadahonda	27.43	29.19	12.58	7.31	7.12	7.68	9.50	9.97	13.06	15.70	18.39	29.09
Méndez Álvaro	50.03	46.02	29.99	18.17	17.23	16.04	21.47	24.47	30.03	36.03	32.19	36.21
Moratalaz	54.37	51.43	31.74	21.16	17.73	20.85	23.03	24.89	30.01	37.50	37.31	24.34
Móstoles	30.59	26.12	15.96	9.20	9.48	9.10	12.60	13.72	17.08	18.36	21.85	12.02
Paseo de la Castellana	51.74	49.22	29.45	18.99	14.58	19.37	21.79	20.23	27.29	37.58	37.43	38.99
Plaza Elíptica	69.00	65.59	46.45	32.63	32.74	34.40	44.16	42.68	47.72	53.14	43.84	44.28
Puente Vallecas	54.31	50.45	30.58	20.57	18.21	20.56	23.95	25.43	31.16	37.57	35.80	36.64
Pza Carmen	52.01	48.26	29.23	17.32	17.71	20.75	29.60	28.16	33.18	38.37	37.18	36.84
Pza Castilla	51.71	44.96	29.08	21.54	17.16	21.68	20.06	21.60	29.35	36.64	34.81	36.43
Pza España	50.82	49.09	23.08	17.74	25.84	27.39	30.27	28.16	31.81	32.65	31.41	36.29
Retiro	42.60	38.14	22.37	12.90	11.65	10.94	14.50	15.78	20.25	28.22	27.96	29.97
Rivas-Vaciamadrid	28.02	27.44	15.47	9.00	9.85	11.73	14.36	16.84	18.27	20.83	21.44	20.50
Sanchinarro	48.98	44.32	24.95	17.01	13.26	15.90	18.13	19.55	24.25	32.14	31.90	33.87
Torrejón de Ardoz	43.98	37.11	21.68	14.89	16.41	13.84	15.14	23.78	24.99	28.49	28.50	29.70
Villaverde Alto	52.98	57.42	35.23	21.98	20.32	22.28	25.39	29.16	34.82	41.60	39.08	39.84

Tabla 4. Contaminación media NO₂ periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia

Enlace: <https://drive.google.com/drive/folders/1Pxq9wUI1DwvIEBAHqiN2NTdnWSlXgW8?usp=sharing>

NOMBRE	TIPO	INTERPOLACIÓN	TENDENCIA	POLINOMIO	VORONOI	ANISOTROPIA	HISTOGRAMA	AJUSTE	SVSEARCH	OPTIMIZE	MODELO	NUGGET	LAG
ene-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL	SEGUNDO	OK	VERDADERA	BOX COX 1	Bastante Ajustado	29.1	NO	K-BESSEL	50.81030021	0,0197270144843
feb-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0.9	Bastante Ajustado	64.9	NO	K-BESSEL	40.70993649	0,0202129711476
mar-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL (NORTE)	SEGUNDO	OK	VERDADERA	BOX COX 0.8	Bastante Ajustado	172.3	NO	J-BESSEL	19.0698969	0,0200942693369
abr-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL	SEGUNDO	OK	VERDADERA	BOX COX 0.5	Bastante Ajustado	279	NO	J-BESSEL	2.477860115	0,0214328065160
may-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL	SEGUNDO	OK	VERDADERA	BOX COX 0.5	Bastante Ajustado	72	NO	R.QUADRATIC	2.19351058	0,0272129711476
jun-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL (MÁS ACENTUADO)	SEGUNDO	OK	VERDADERA	BOX COX 0.6	Bastante Ajustado	12	NO	K-BESSEL	4.231222373	0,0285979052134
jul-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL (NORTE)	SEGUNDO	OK	VERDADERA	BOX COX 0.4	Bastante Ajustado	30	NO	K-BESSEL	1.099145719	0,0295825610600
ago-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL (NORESTE)	SEGUNDO	OK	VERDADERA	BOX COX 0.6	Bastante Ajustado	101.7	NO	R.QUADRATIC	2.847361986	0,0167746362343
sep-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL	SEGUNDO	OK	VERDADERA	BOX COX 0.7	Bastante Ajustado	252	NO	R.QUADRATIC	4.999558362	0,0257270144843
oct-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL	SEGUNDO	OK	VERDADERA	BOX COX 0.8	Bastante Ajustado	10.6	NO	J-BESSEL	11.65933136	0,0250838836307
nov-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL	SEGUNDO	OK	VERDADERA	BOX COX 0.7	Bastante Ajustado	274	NO	K-BESSEL	3.932734699	0,0191243024230
dic-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL ESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,6	Bastante Ajustado	21.7	NO	HOLE_E	66,9612958827501	0,0254578712021
ene-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL NORTE	SEGUNDO	OK	VERDADERA	BOX COX 1,5	Bastante Ajustado	355.9	NO	J-BESSEL	1875.244877	0,0200942696524
feb-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL SUR ESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 1,3	Bastante Ajustado	26.2	NO	J-BESSEL	320.8180627	0,0200942696524
mar-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL SUR ESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 1,3	Bastante Ajustado	242.9	NO	J-BESSEL	119.9167169	0,0227611270649
abr-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL SUR ESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,9	Bastante Ajustado	2.7	NO	HOLE_E	6.457447952	0,0249724152921
may-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	ESTE	SEGUNDO	OK	VERDADERA	BOX COX 0,1	Bastante Ajustado	138.8	NO	J-BESSEL	0.101985708	0,0193316147399
jun-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	ESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,7	Bastante Ajustado	133.1	NO	GAUSSIAN	0,1765575823503	0,0257193492871
jul-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	ESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,6	Bastante Ajustado	56.4	NO	GAUSSIAN	0,1452746486936	0,0251301139933
ago-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRO SUR	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,6	Bastante Ajustado	1.2	NO	J-BESSEL	0,3409682767867	0,0311581496803
sep-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRO SUR	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,9	Bastante Ajustado	6	NO	HOLE_E	11.45270785	0,0306193492871
oct-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRO	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,9	Bastante Ajustado	143.5	NO	J-BESSEL	11.7635611	0,0290838839390
nov-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRO	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 1,3	Bastante Ajustado	277.8	NO	J-BESSEL	320.6394852	0,0281243027240
dic-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRO	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 1,4	Bastante Ajustado	285.1	NO	J-BESSEL	2.22395E+13	0,0313923199703

Tabla 5. Interpolaciones NO₂ periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia

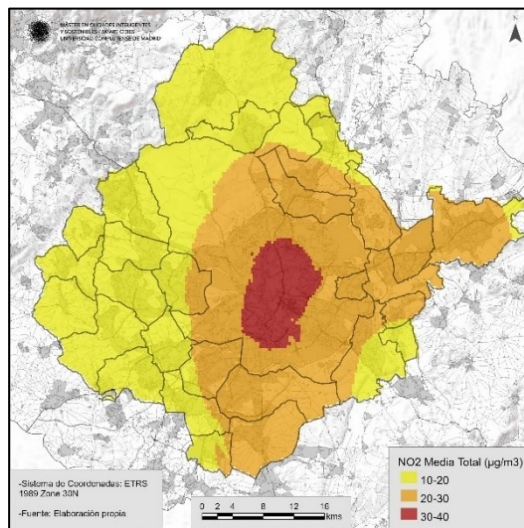


Figura 67. Media NO₂ Área de Estudio. Fuente: Elaboración propia

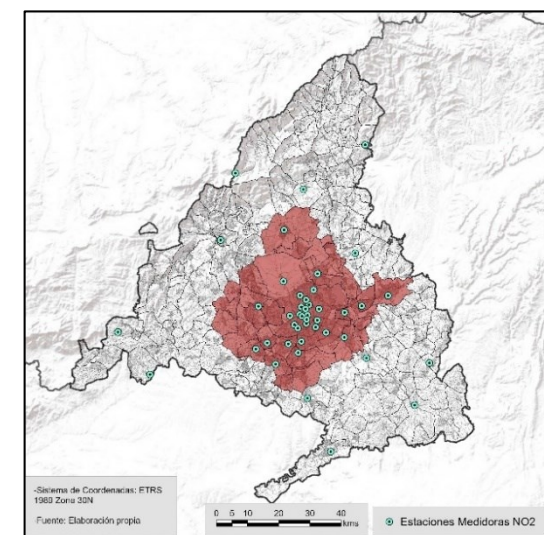


Figura 68. Estaciones NO₂ periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia

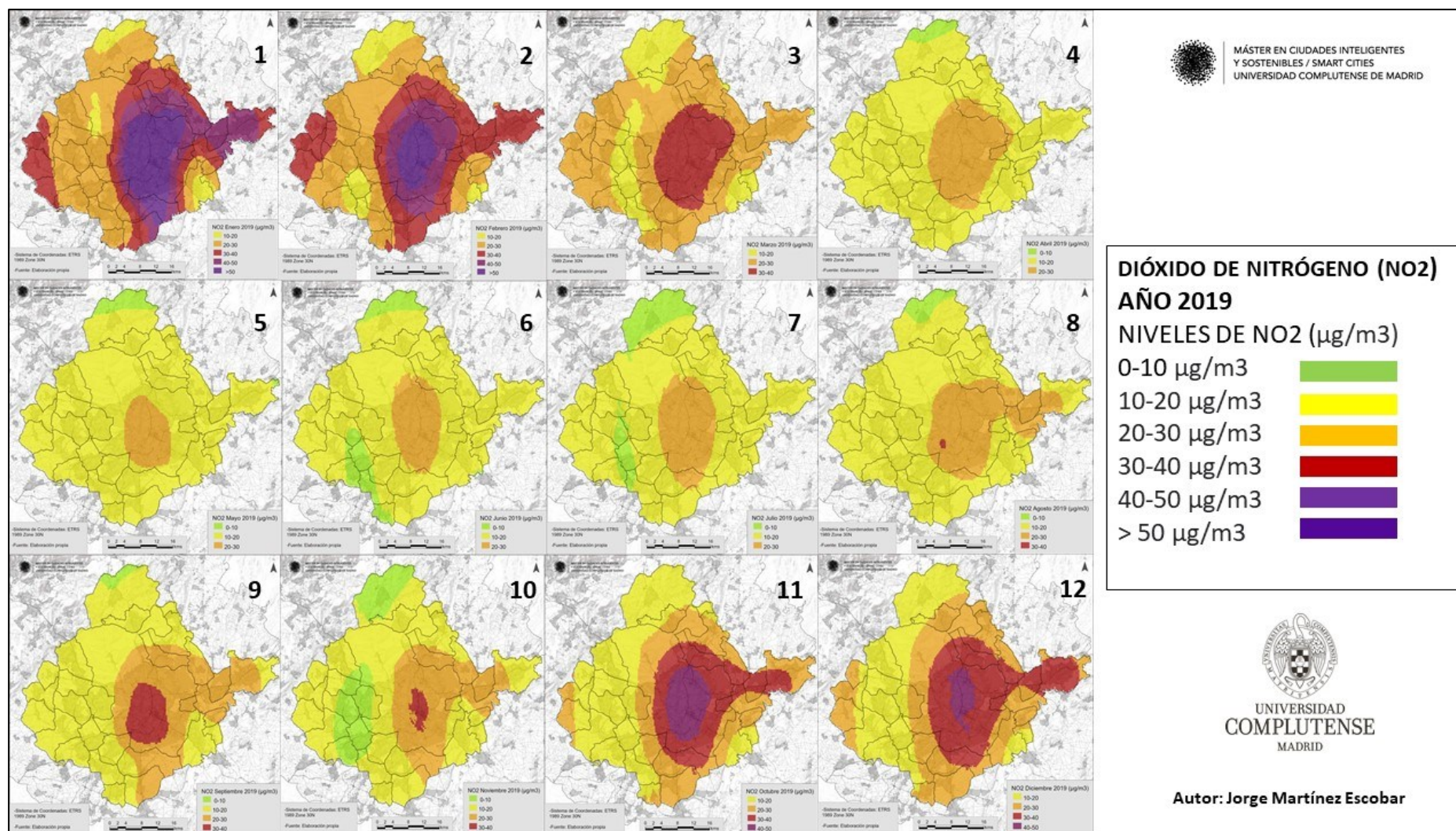


Figura 69. Evolución Mensual 2019 NO₂ Área de Estudio. Fuente: Elaboración propia

Enlace: <https://drive.google.com/drive/folders/1r4NfCkcp-yo46a1laYfK9dF1fyfMhb6?usp=sharing>

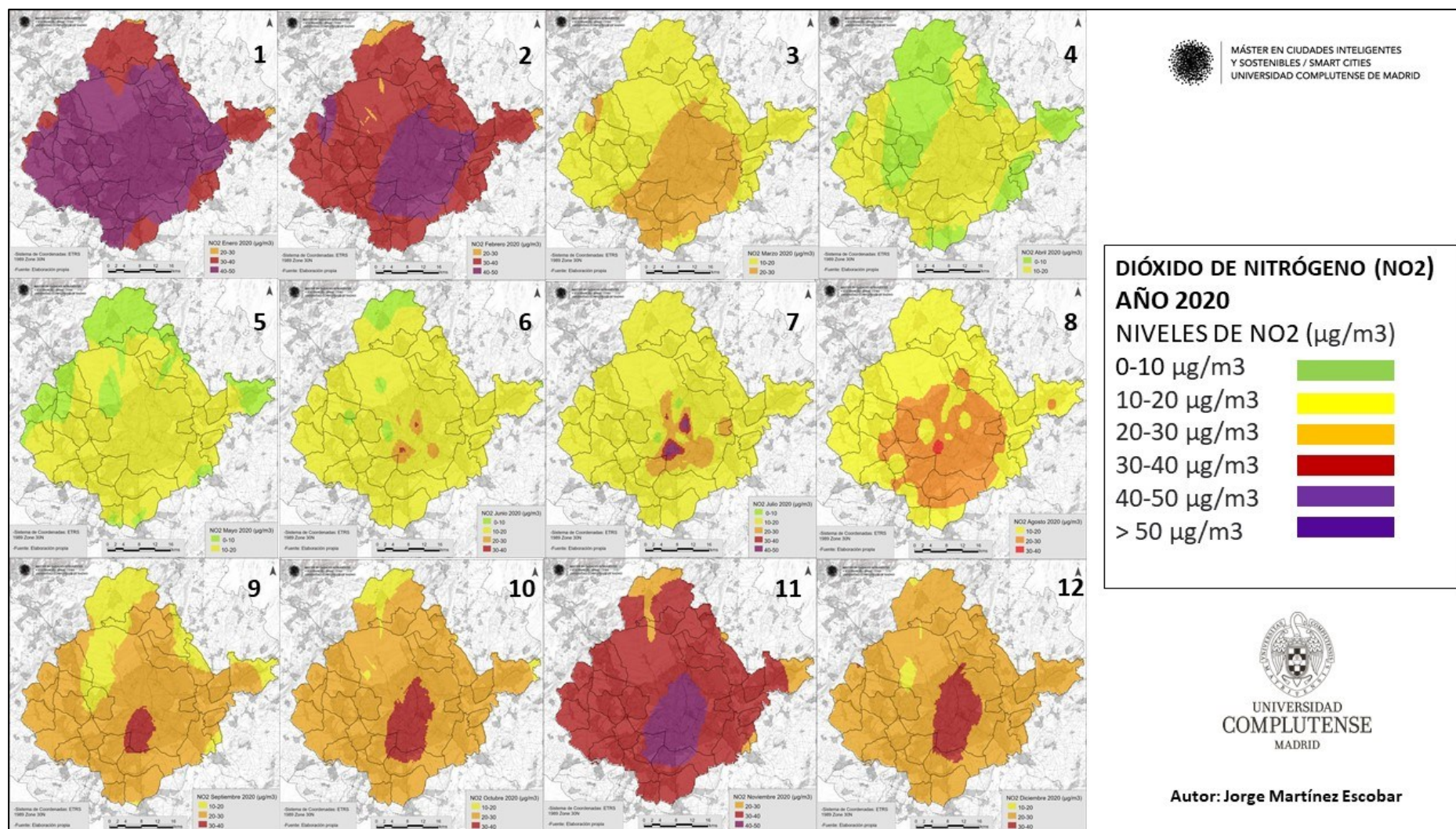


Figura 70. Evolución Mensual 2020 NO₂ Área de Estudio. Fuente: Elaboración propia

Enlace: <https://drive.google.com/drive/folders/1ir4NfCkcp-yo46a1laYfK9dF1fyfMhb6?usp=sharing>

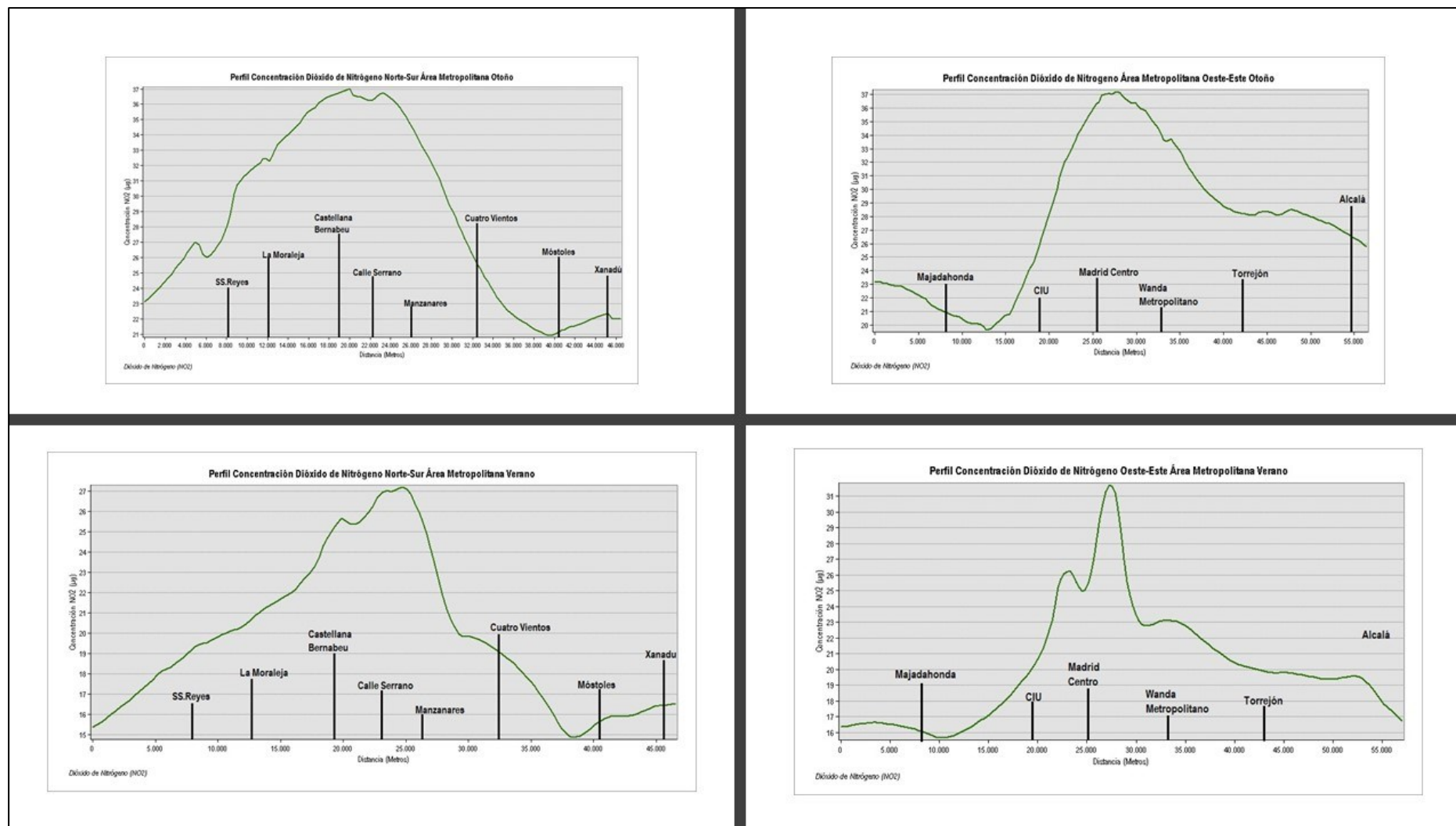


Figura 71. Perfiles NO₂ Área de Estudio. Fuente: Elaboración propia

Enlace: <https://drive.google.com/drive/folders/1q12gK5brsTKJzda1ji1vCQ24BF0G49q5?usp=sharing>

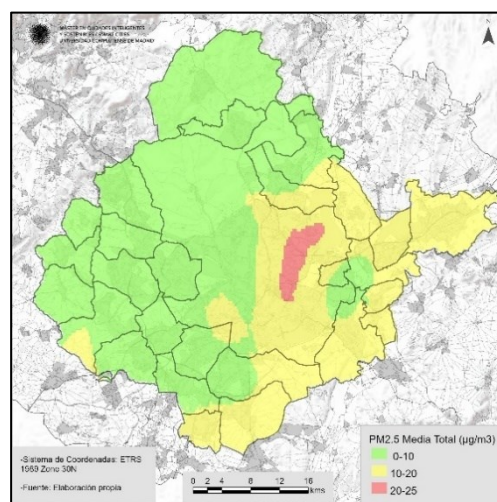
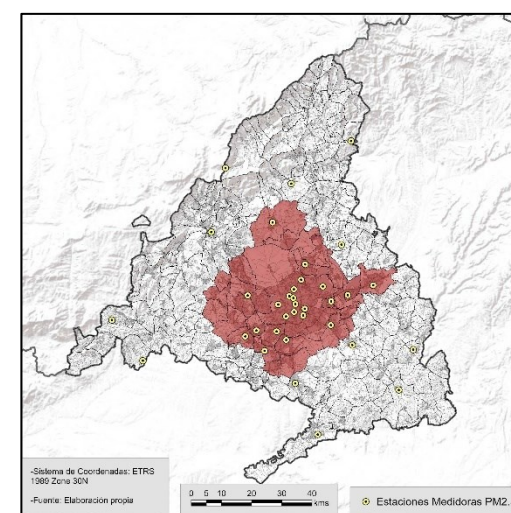
8.4 Contaminación por PM_{2.5} (Material Particulado) en el Área Metropolitana de Madrid.

MUNICIPIO	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Aeropuerto de Barajas	23.26	29.65	16.71	13.97	18.03	24.69	34.26	22.06	21.18	17.52	18.47	17.05
Alcalá de Henares	17.97	16.87	10.57	7.99	8.29	10.20	14.09	11.64	9.69	12.44	12.20	11.61
Alcobendas	9.69	11.70	7.04	4.71	5.63	7.30	10.79	7.74	7.18	8.08	7.54	7.67
Alcorcón	11.01	15.18	6.00	4.89	5.71	6.26	9.08	6.98	6.80	7.29	9.17	6.87
Aranjuez	9.77	10.62	7.54	4.97	6.57	8.78	13.33	10.27	9.34	8.73	7.62	6.57
Arganda del Rey	12.31	13.80	8.39	5.27	7.00	9.39	13.21	9.78	9.37	11.63	7.89	7.02
Casa de Campo	13.45	11.60	7.15	5.71	6.77	9.79	11.53	8.11	6.98	7.45	7.85	7.98
Colmenar Viejo	9.89	11.39	6.75	4.53	5.68	7.65	11.44	8.18	7.42	8.23	7.66	6.67
Coslada	13.27	14.59	7.29	4.74	5.54	7.11	9.33	7.50	7.02	8.01	9.58	8.26
Cuatro Caminos	15.02	13.74	7.98	6.29	6.47	8.03	9.40	8.11	8.34	8.50	8.79	9.73
Escuelas Aguirre	13.47	12.60	10.85	7.39	9.31	6.53	11.26	9.16	7.81	9.18	9.34	8.84
Fuenlabrada	12.24	14.50	9.04	6.08	7.15	8.96	12.83	8.72	8.78	8.87	9.21	7.44
Getafe	11.87	11.22	7.12	5.55	6.56	7.25	10.26	8.07	7.99	8.85	10.36	7.97
Guadalix de la Sierra	8.55	9.84	6.01	3.66	4.50	6.42	9.90	6.65	6.12	5.71	6.28	5.78
Leganés	15.25	13.79	7.52	5.96	6.21	7.29	10.02	8.02	8.12	8.36	11.36	8.90
Majadahonda	8.79	9.79	5.99	4.34	5.01	6.76	10.04	7.16	6.91	6.28	6.28	5.39
Méndez Álvaro	13.31	12.29	7.11	6.10	5.03	6.06	9.92	9.39	10.66	7.87	7.97	8.42
Moratalaz	24.32	29.24	17.34	13.06	12.52	18.05	26.03	19.58	18.79	19.61	17.26	26.24
Móstoles	11.58	11.44	7.26	4.74	6.24	7.45	11.20	7.99	8.15	7.65	7.64	6.95
Paseo de la Castellana	13.85	14.03	7.65	6.06	6.52	8.97	13.23	8.40	7.81	8.29	9.18	9.74
Plaza Elíptica	17.68	15.42	8.82	6.89	7.11	8.31	11.45	11.18	10.66	11.44	10.87	10.21
Puerto de Cotos	3.10	4.24	3.97	3.25	3.70	4.16	6.24	4.31	3.41	2.92	2.79	1.92
Pza Castilla	12.61	12.21	7.19	6.02	5.74	7.50	10.50	8.19	6.11	7.69	8.34	9.50
Rivas-Vaciamadrid	14.91	15.91	9.46	5.96	7.25	9.71	12.90	9.45	8.50	10.06	9.69	9.07
Sanchinarro	18.10	20.50	11.94	8.97	10.32	15.03	20.56	14.47	14.34	11.56	12.00	10.42
Torrejón de Ardoz	12.75	16.93	10.25	7.78	9.24	10.55	12.96	10.03	10.58	10.52	12.12	7.00
Valdemoro	17.46	14.88	9.49	6.71	7.88	8.64	11.60	10.59	10.90	12.23	12.55	12.35
Vallecas	20.48	23.06	14.15	9.92	10.95	14.81	24.32	17.42	17.15	17.87	14.95	12.85
Villa del Prado	13.26	12.67	8.98	7.52	8.92	10.39	13.80	11.50	9.67	8.22	11.34	8.31

Tabla 6. Contaminación media PM_{2.5} periodo de estudio. Fuente: Elaboración propia

Enlace: <https://drive.google.com/drive/folders/1nW99FUoN832c6uhSmlfBgmgNyR3mg9s?usp=sharing>

NOMBRE	TIPO	INTERPOLACIÓN	TENDENCIA	POLINOMIO	VORONOI	ANISOTROPÍA	HISTOGRAMA	AJUSTE	SVSEARCH	OPTIMIZE	MODELO	NUGGET	LAG
ene-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL NORESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,8	Bastante Ajustado	20.8	NO	J-BESSEL	2.17813140633504	0,0253200611416195
feb-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	NORESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,5	Bastante Ajustado	58	NO	HOLE_E	0,53774811540686	0,0213200611416195
mar-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL NORESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,1	Bastante Ajustado	330.3	NO	HOLE_E	0,058341328179777	0,0213200611416195
abr-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL NORESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,1	Bastante Ajustado	90.7	NO	HOLE_E	0,06090711075689	0,0253200611416195
may-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL NORESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,2	Bastante Ajustado	41	NO	HOLE_E	0,0173378438218962	0,0213200611416195
jun-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	NORESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,4	Bastante Ajustado	355.9	NO	HOLE_E	0,1373377542583	0,0259320061141619
jul-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL NORESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,4	Bastante Ajustado	321.3	NO	HOLE_E	0,576276954981879	0,0213200611416195
ago-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	NORESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,7	Bastante Ajustado	72.9	NO	J-BESSEL	0,3	0,0413200611416195
sep-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,4	Bastante Ajustado	274	NO	HOLE_E	0,086506097581592	0,024227151629003
oct-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	ESTE-NORESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,8	Bastante Ajustado	162.1	NO	HOLE_E	0,7	0,0413200611416195
nov-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	NORESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,2	Bastante Ajustado	212	NO	R-QUADRATIC	0	0,0253200611416195
dic-19	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	NORESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,7	Bastante Ajustado	SIN	NO	HOLE_E	0,234903556273924	0,0383552835717338
ene-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	ESTE-SUR	SEGUNDO	OK	VERDADERA	BOX COX 1	Bastante Ajustado	1	NO	J-BESSEL	2.67341858736866	0,0313200611416195
feb-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	NORESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,3	Bastante Ajustado	163	NO	HOLE_E	0,05	0,0313200611416195
mar-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	ESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,1	Bastante Ajustado	47.6	NO	HOLE_E	0,053049690315393	0,0253200611416195
abr-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	NORESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,1	Bastante Ajustado	196.4	NO	J-BESSEL	0,0195435618535319	0,042254062443862
may-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	NORESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,2	Bastante Ajustado	294.3	NO	HOLE_E	0,022360154385673	0,032254062443862
jun-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	ESTE-NORESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	LOG	Bastante Ajustado	235.8	NO	HOLE_E	0,034082164511297	0,0303200611416195
jul-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	ESTE-NORESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,1	Bastante Ajustado	131.6	NO	HOLE_E	0,0019719776966185	0,0313200611416195
ago-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	ESTE-NORESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	LOG	Bastante Ajustado	223.2	NO	HOLE_E	0,0308000027751049	0,0353200611416195
sep-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	NORTE-NORESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,2	Bastante Ajustado	271.2	NO	J-BESSEL	0,106052922172412	0,0413200611416195
oct-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL-ESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	LOG	Bastante Ajustado	254.2	NO	HOLE_E	0,0390544183624955	0,0253200611416195
nov-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	NORESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,9	Bastante Ajustado	164.1	NO	HOLE_E	0,95387050731679	0,0253200611416195
dic-20	SIMPLE KRIGGING	PREDICTION	CENTRAL ESTE	SEGUNDO	OK	FALSA	BOX COX 0,1	Bastante Ajustado	111.5	NO	J-BESSEL	0,7162733008545	0,0313200611416195

Tabla 7. Interpolaciones PM_{2.5} periodo de estudio. Fuente: Elaboración propiaFigura 72. Media PM_{2.5} Área de Estudio. Fuente: Elaboración propiaFigura 73. Estaciones PM_{2.5} Área de Estudio. Fuente: Elaboración propia

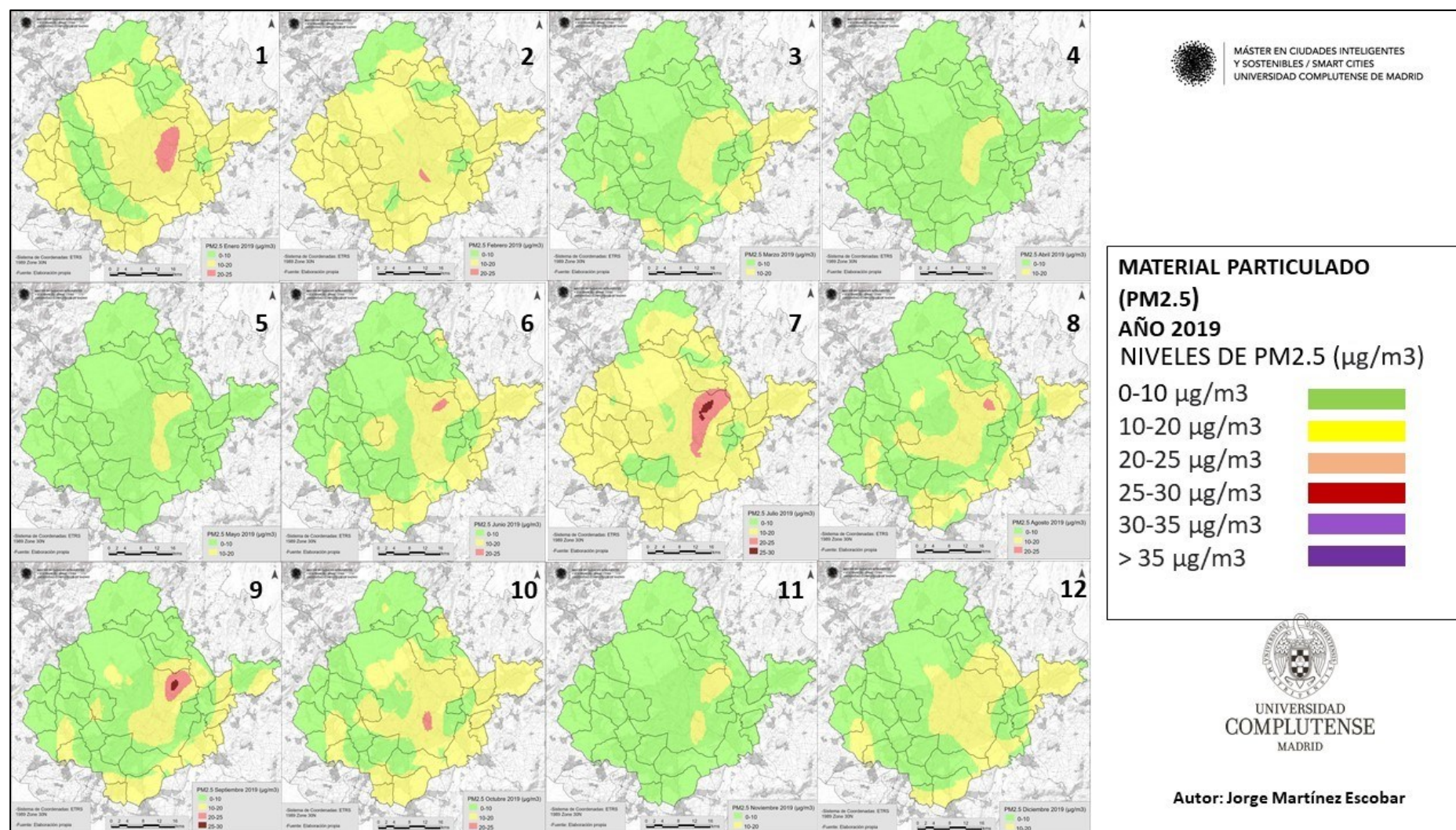


Figura 74. Evolución Mensual 2019 PM_{2.5} Área de Estudio. Fuente: Elaboración propia

Enlace: <https://drive.google.com/drive/folders/1qUau-1GFhPmBlo9VEiXGPSbePRrq-wpT?usp=sharing>

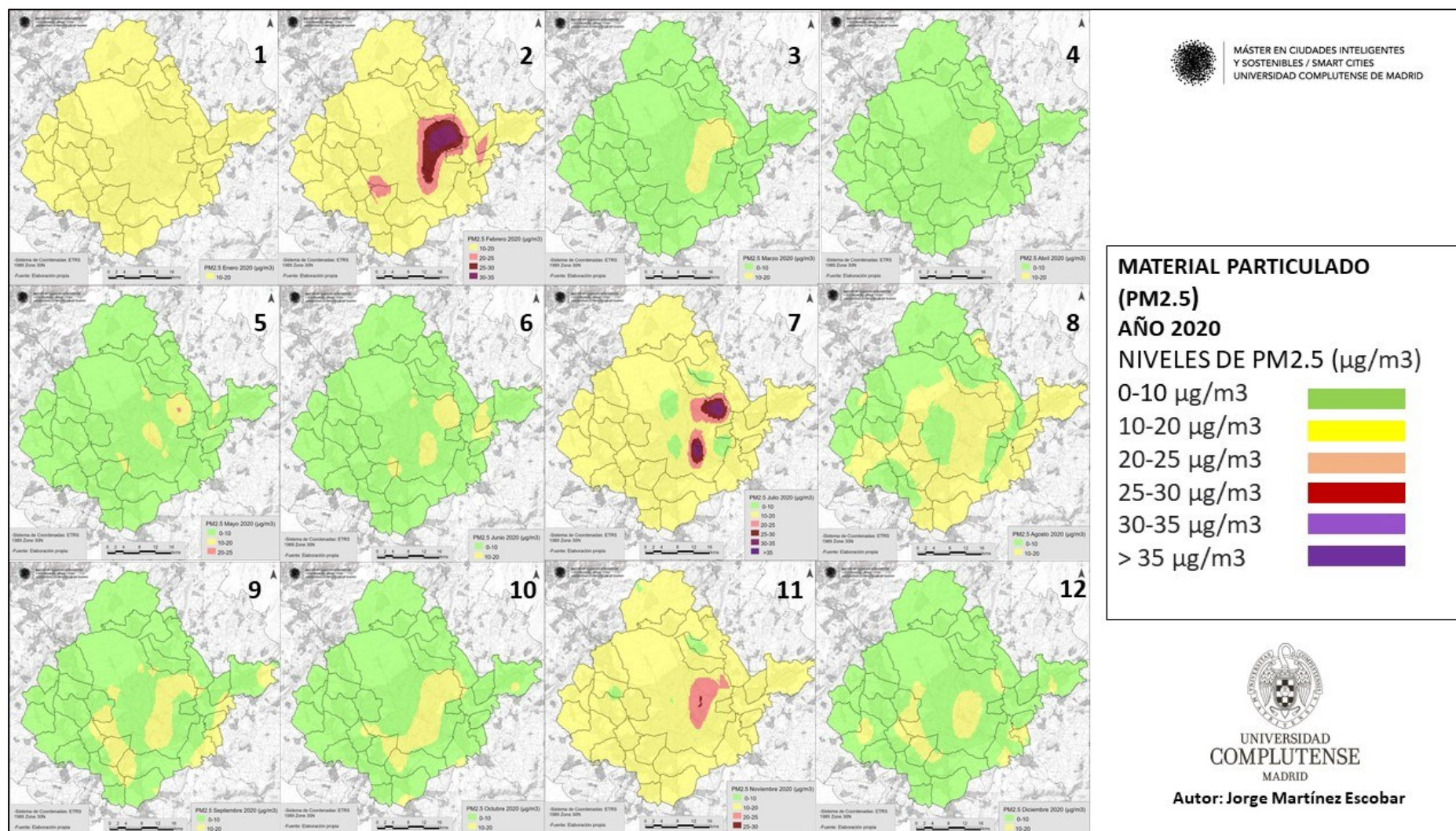


Figura 75. Evolución Mensual 2020 PM_{2.5} Área de Estudio. Fuente: Elaboración propia

Enlace: <https://drive.google.com/drive/folders/1qUau-1GFhPmBlo9VEiXGPSbePRrq-wpT?usp=sharing>

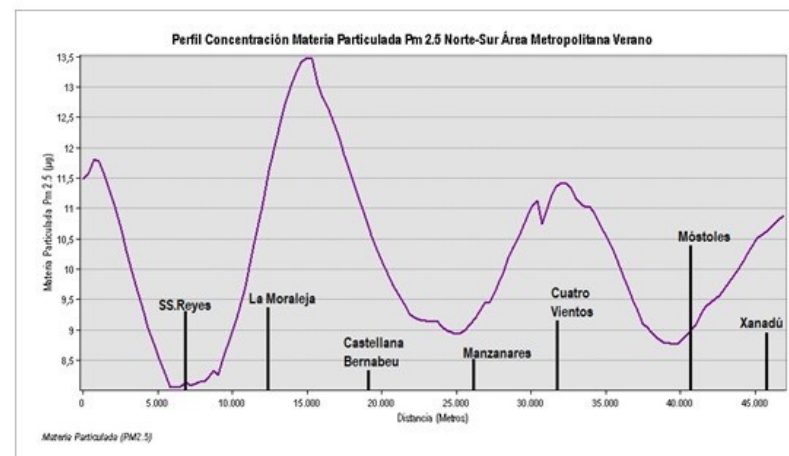
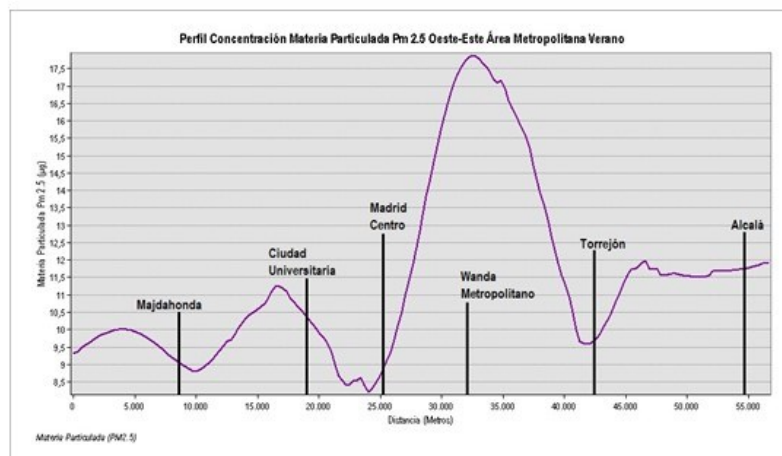
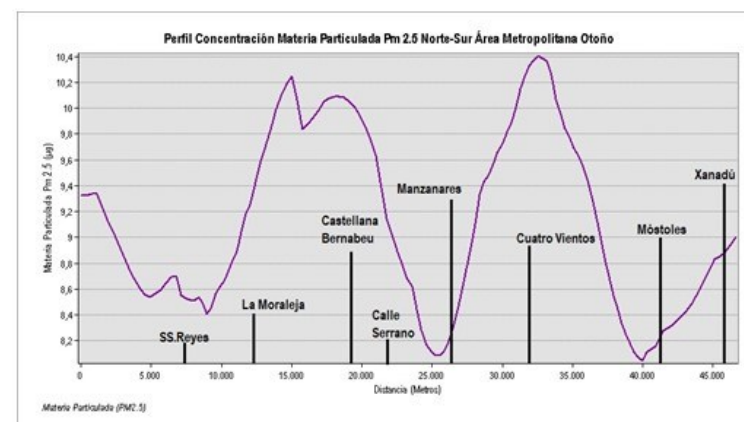
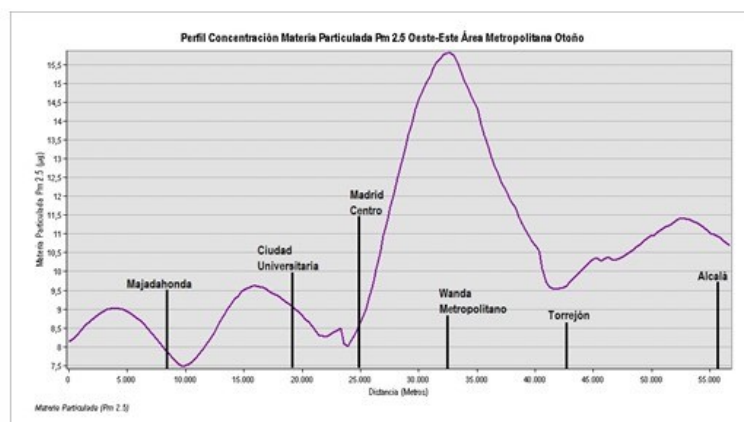


Figura 76. Perfiles PM_{2.5} Área de Estudio. Fuente: Elaboración propia

Enlace: <https://drive.google.com/drive/folders/1SMCAgvzxWiPbucnktMDsTfyKFZuXlORB?usp=sharing>

8.5 La COVID-19 en el Área Metropolitana de Madrid.

MUNICIPIO	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Total
Coslada	137.77	287.47	32.09	14.70	10.10	168.99	480.65	578.61	384.52	254.71	234.96
Fuenlabrada	123.90	204.18	33.14	13.94	23.49	263.55	778.78	687.66	351.83	266.39	274.69
Getafe	97.75	166.60	36.10	28.09	17.86	156.92	561.28	561.15	253.99	243.08	212.28
Leganés	199.09	461.65	53.09	47.14	26.60	147.61	422.02	508.27	237.28	206.60	230.93
Majadahonda	111.73	175.08	50.40	13.57	14.27	174.38	492.86	603.89	509.91	289.59	243.57
Mejorada del Campo	104.19	307.21	26.64	4.30	2.15	156.83	429.67	428.59	435.03	361.99	225.66
Móstoles	108.87	281.93	57.46	21.51	30.36	237.11	489.04	454.38	329.25	328.42	233.83
Paracuellos de Jarama	39.58	75.19	5.54	9.89	4.95	155.33	376.95	439.28	259.21	238.44	160.43
Parla	83.57	135.64	19.67	11.91	9.99	261.67	871.09	785.60	312.59	237.08	272.88
Pinto	73.78	104.24	40.36	31.89	13.33	98.05	363.63	462.16	384.57	176.10	174.81
Pozuelo de Alarcón	132.49	189.19	69.20	9.84	6.66	140.59	400.36	489.17	328.04	260.06	202.56
Rivas-Vaciamadrid	84.52	173.28	24.05	12.20	8.23	130.74	399.32	451.79	287.01	224.33	179.55
Las Rozas de Madrid	85.58	213.70	48.01	10.96	7.83	91.06	302.67	370.51	376.25	278.41	178.50
San Fernando de Henares	130.61	300.52	35.00	12.68	6.97	111.59	401.96	528.76	322.07	259.31	210.95
San Sebastián de los Reyes	47.05	190.42	43.46	31.36	11.76	238.87	588.07	511.90	357.88	331.28	235.20
Torrejón de Ardoz	161.56	137.97	26.03	23.79	14.65	260.13	623.59	565.55	297.62	141.01	225.19
Velilla de San Antonio	69.47	212.49	34.33	10.22	6.13	102.16	402.50	539.39	255.40	298.30	193.04
Villanueva de la Cañada	69.95	137.56	86.73	30.31	4.66	81.61	256.47	411.52	451.16	262.30	179.23
Villanueva del Pardillo	87.31	132.42	44.24	10.19	2.91	113.51	372.53	385.62	259.02	269.21	167.69
Villaviciosa de Odón	107.78	170.65	37.36	11.68	5.39	63.77	300.88	312.56	288.31	288.31	158.67
Tres Cantos	70.20	212.17	84.24	11.00	11.53	55.53	246.22	360.95	257.22	180.21	148.93
Madrid_Centro	99.74	238.42	40.49	21.32	27.07	201.15	672.61	535.42	326.67	307.38	247.03
Arganzuela	127.76	285.76	44.60	15.60	22.43	203.67	573.95	505.36	293.56	251.46	232.41
Retiro	176.42	302.56	65.71	38.97	17.60	142.69	436.44	481.91	314.08	235.30	221.17
Salamanca	155.89	276.69	45.31	13.35	15.92	134.84	506.49	520.35	364.64	289.69	232.32
Chamartín	147.42	280.60	51.01	13.03	13.37	121.02	466.41	456.98	330.99	293.46	217.43
Tetuan	181.62	349.16	42.15	11.07	12.97	179.09	596.91	567.80	349.48	249.02	253.93
Chamberí	125.56	285.37	56.54	21.70	15.96	114.26	297.93	477.48	412.73	346.18	215.37
Fuencarral_ElPardo	151.56	309.12	40.01	22.97	7.93	110.80	403.96	445.24	301.29	283.00	207.59
Moncloa	132.31	291.20	64.48	18.84	23.03	128.75	431.68	545.77	429.16	327.42	239.26
Latina	134.12	293.01	58.01	26.03	19.31	191.74	441.72	536.06	285.98	235.81	222.18
Carabanchel	145.00	249.02	50.65	19.06	18.27	330.80	838.81	641.94	307.88	215.53	281.70
Usera	152.61	252.25	38.07	13.42	19.14	467.65	1071.81	714.00	271.93	228.64	322.95
Puente de Vallecas	173.62	343.19	57.06	30.02	22.89	387.79	1152.19	818.48	385.56	237.06	360.78
Moratalaz	175.53	401.03	61.75	51.55	16.92	166.81	577.09	593.74	376.71	233.69	265.48
Ciudad Lineal	132.93	274.06	42.17	18.27	14.33	205.87	773.29	549.40	373.01	245.74	262.90
Hortaleza	125.15	253.07	31.14	11.43	9.57	122.49	428.56	426.44	314.71	309.27	203.18
Villaverde	157.61	235.15	40.42	25.68	23.16	367.25	1033.09	733.49	317.57	215.52	314.89
Villa de Vallecas	185.07	276.36	31.53	19.71	8.84	207.72	636.98	610.47	308.07	199.79	248.45
Vicalvaro	156.05	298.24	57.43	25.32	24.27	182.41	614.50	593.35	330.83	200.44	248.28
San Blas	127.73	239.18	36.42	15.97	12.81	157.61	681.20	532.43	314.12	205.99	232.35
Barajas	127.19	229.85	20.02	13.28	12.26	109.82	575.65	387.68	248.75	274.80	199.93

Tabla 8. IA Acumulada Marzo-Diciembre 2020. Fuente: Elaboración propia

MUNICIPIO	FALLECIDOS/100.000 Habs
Alcalá de Henares	220
Alcobendas	160
Alcorcón	196
Boadilla del Monte	64
Brunete	112
Colmenar Viejo	200
Coslada	134
Fuenlabrada	135
Getafe	154
Leganés	329
Madrid	211
Majadahonda	105
Mejorada del Campo	131
Móstoles	160
Paracuellos del Jarama	58
Parla	106
Pinto	94
Pozuelo de Alarcón	150
Rivas-Vaciamadrid	59
Las Rozas de Madrid	109
San Fernando de Henares	169
San Sebastián de los Reyes	99
Torrejón de Ardoz	128
Velilla de San Antonio	57
Villanueva de la Cañada	95
Villanueva del Pardillo	81
Villaviciosa de Odón	114
Tres Cantos	135

Tabla 9. Fallecidos Marzo-Diciembre 2020. Fuente: Elaboración propia

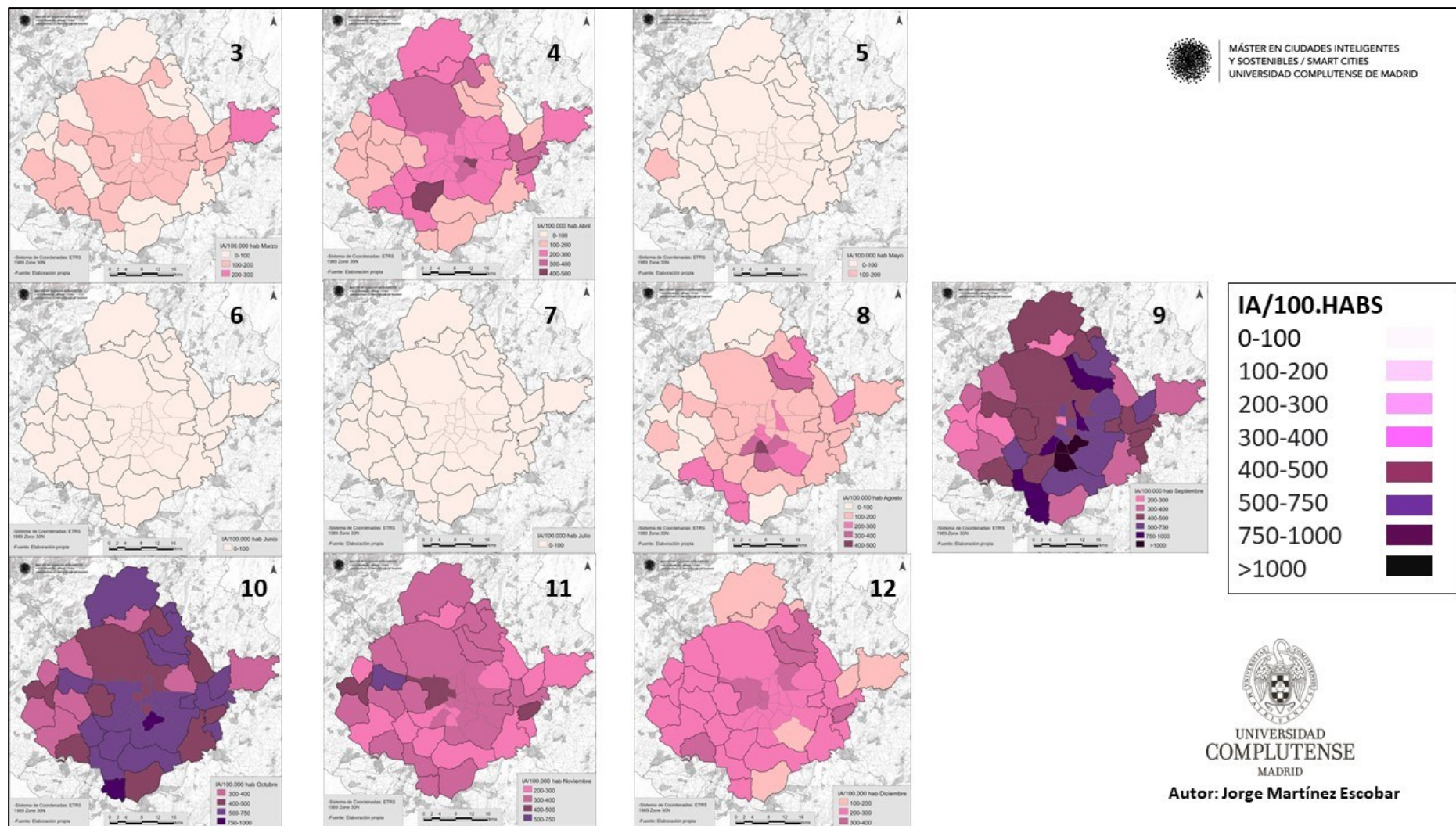


Figura 77. IA COVID Marzo-Diciembre. Fuente: Elaboración propia

Enlace: https://drive.google.com/drive/folders/14ljMvtKMB_PrfItlyVmoIKAr8MnCCNn?usp=sharing

8.6 Correlación entre temperatura y contaminación por NO₂.

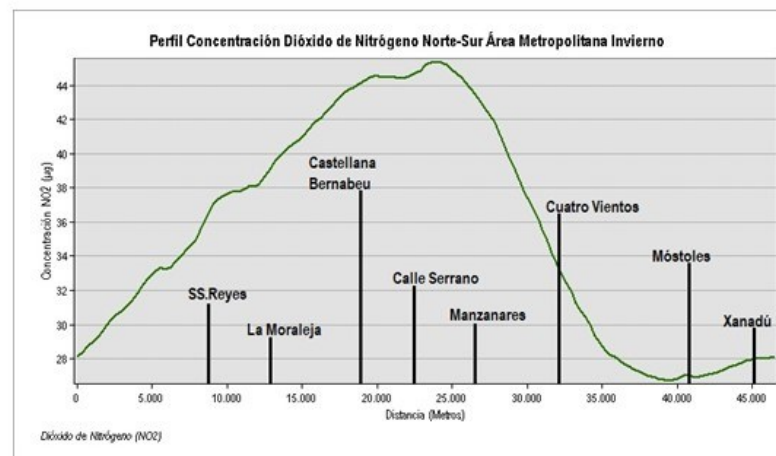
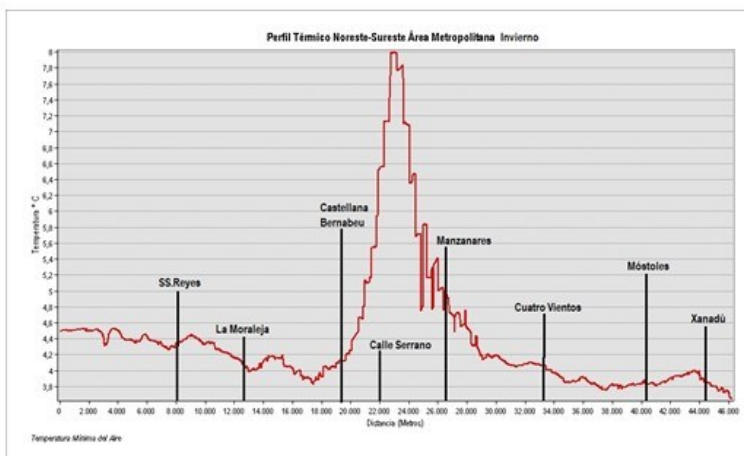
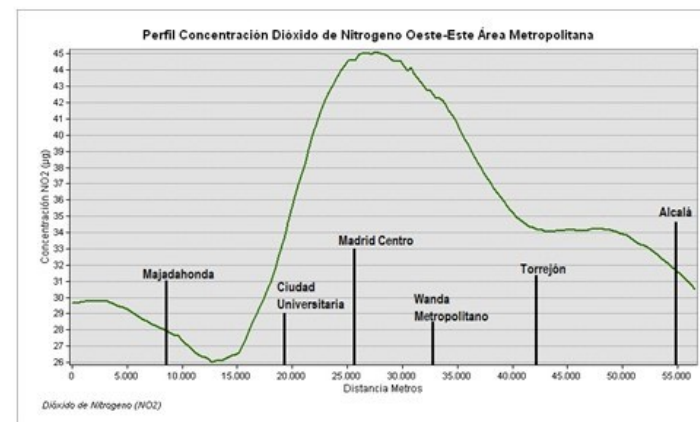
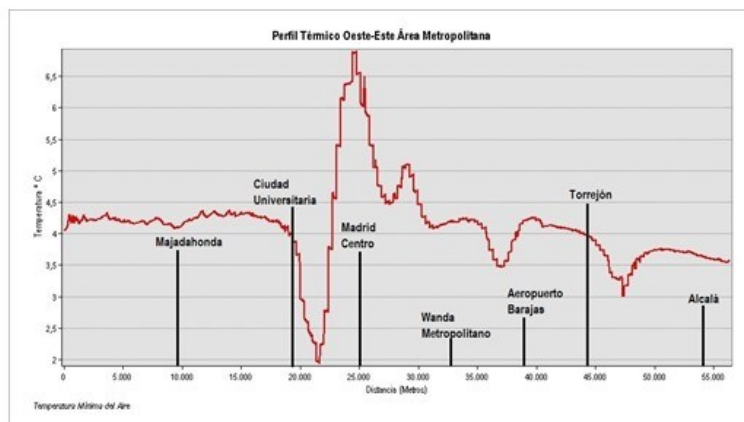


Figura 78. Invierno comparación temperatura-NO₂. Fuente: Elaboración propia

8.7 Correlación entre temperatura y contaminación por PM_{2.5}.

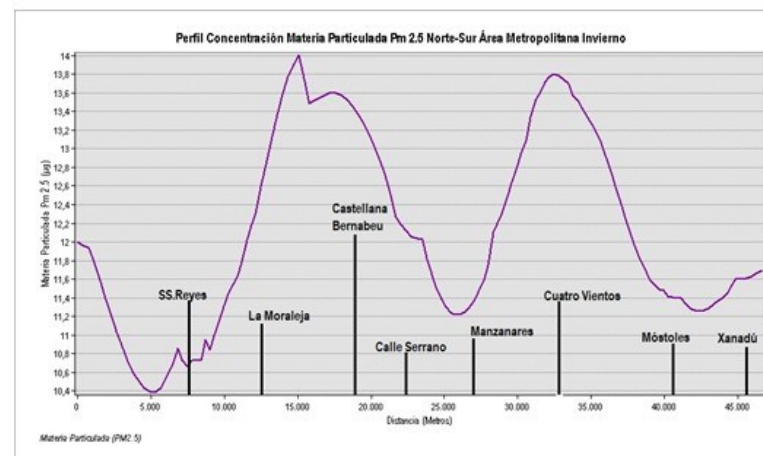
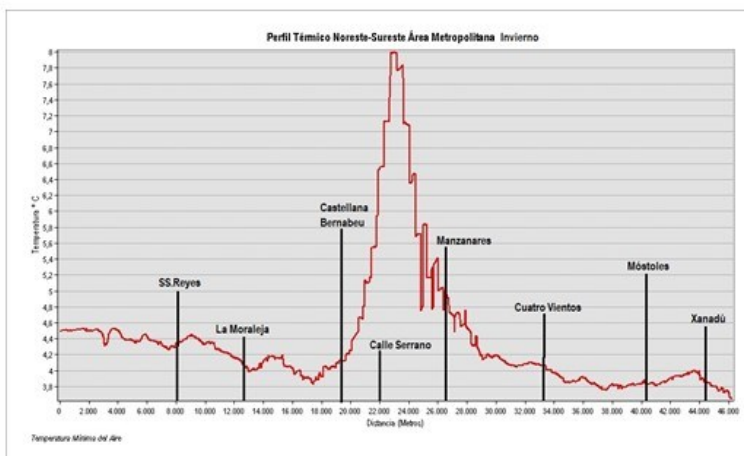
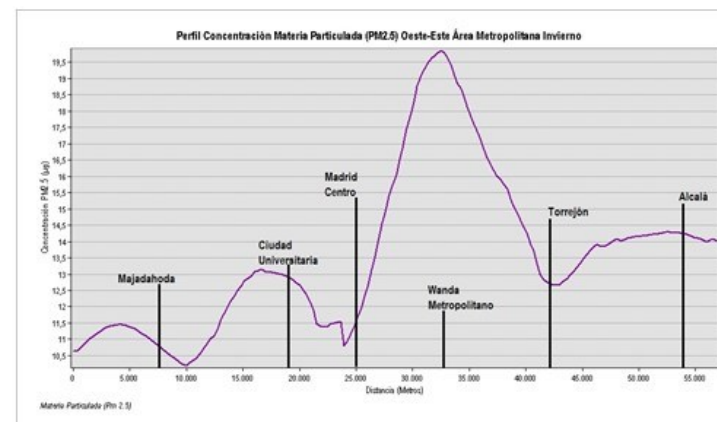
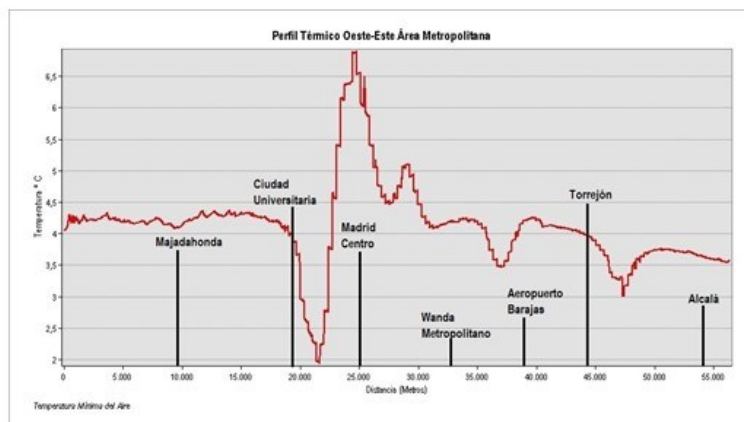


Figura 79. Invierno comparación temperatura-PM_{2.5}. Fuente: Elaboración propia

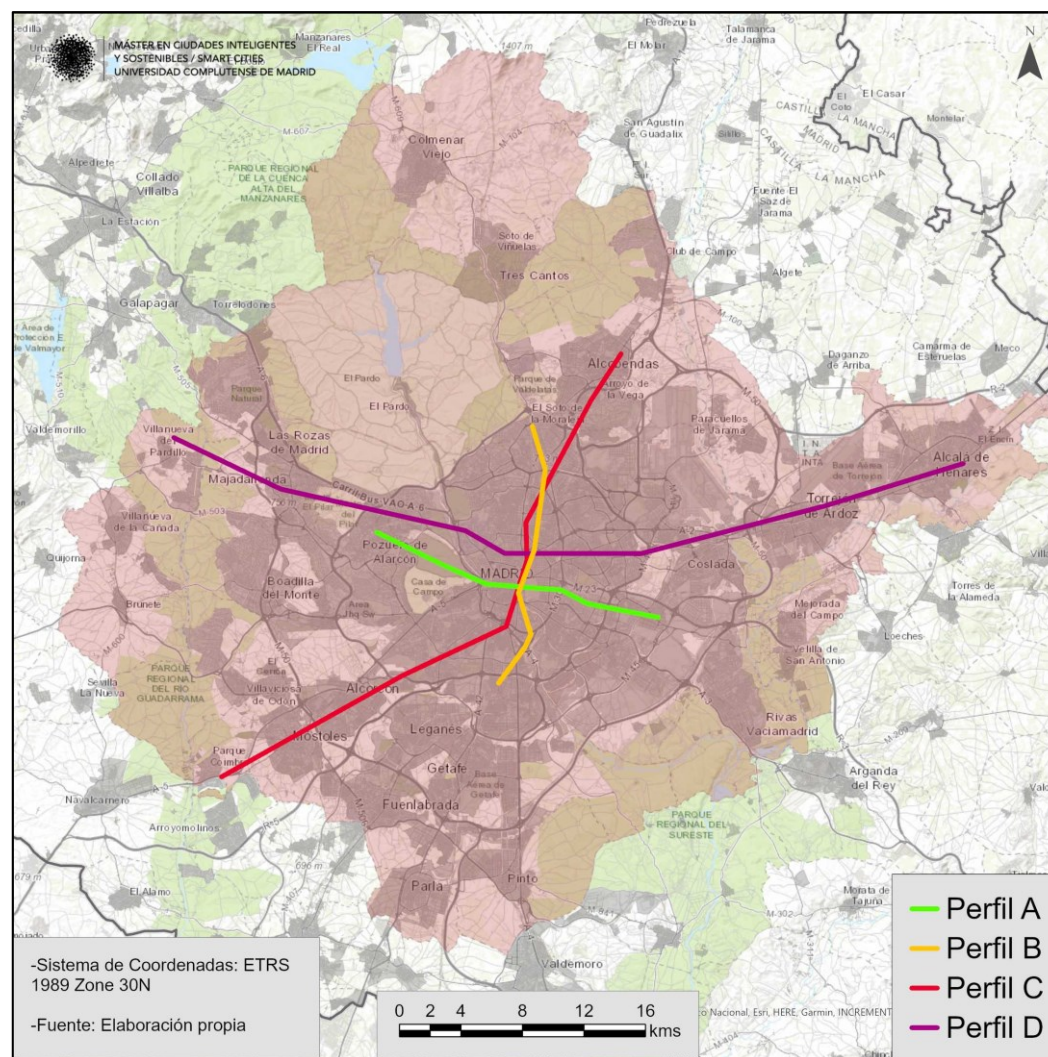


Figura 80. Perfiles Contaminación y Temperatura. Fuente: Elaboración propia